

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE
UNA CÁMARA PARA EL SECADO DE LA MADERA**

JOSÉ FERNANDO ARBELÁEZ GÓMEZ

VÍCTOR RAÚL FERIA HOYOS

CORPORACION UNIVERSITARIA TECNOLOGICA DE BOLÍVAR

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

ÁREA DE LAS TÉRMICAS

CARTAGENA DE INDIAS D.T.C.

2003

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE
UNA CÁMARA PARA EL SECADO DE LA MADERA**

JOSÉ FERNANDO ARBELÁEZ GÓMEZ

VÍCTOR RAÚL FERIA HOYOS

Trabajo de Grado presentado como requisito para optar al título de

Ingeniero Mecánico

Director: Javier Arbeláez Gómez

Ingeniero Químico

CORPORACION UNIVERSITARIA TECNOLOGICA DE BOLÍVAR

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

ÁREA DE LAS TÉRMICAS

CARTAGENA DE INDIAS D.T.C.

2003

NOTA DE ACEPTACIÓN

Firma del Presidente del Jurado

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Cartagena, 27 de Enero del 2003.

ARTICULO 107.

La Institución Universitaria Tecnológica de Bolívar se reserva el derecho de propiedad intelectual de todos los trabajos de grado aprobados los cuales, no pueden ser explotados comercialmente sin su autorización.

DEDICATORIA

Dedico especialmente este trabajo a mi madre, de quien siempre tengo su amor y apoyo incondicional y que debido a su esfuerzo y tenacidad me llevaron a conquistar una meta importante en mi vida.

A mis hermanos Jhon Deiby, Eliécer y Vanesa, a mi padre por su valiosa colaboración, a mi novia Diana por su entrega y amor.

Agradecimientos

A Dios que me dio la fortaleza y paciencia para enfrentar las adversidades.

A la empresa INMUNIZADORA COLOMBIA S.A., por su confianza y apoyo, a Javier Arbeláez por su colaboración y disposición.

A los profesores de la CORPORACION UNIVERSITARIA TECNOLOGICA DE BOLÍVAR, por cuyas clases pasé, en las que me impartieron sus conocimientos y ayuda, pero especialmente al Profesor Luis Majana quien me enseñó el valor del esfuerzo.

A mi tío Luis Carlos por su valiosa ayuda en los momentos difíciles.

José Fernando Arbeláez

Dedico este trabajo a mi madre por todo su apoyo, dedicación y amor en la etapa de mi vida universitaria, por quien he luchado para conseguir este título.

A mi padre por todo el apoyo y exigencias que sirvieron para que hoy en día esté optando por este título.

A mis hermanas Angélica, Lina Paola y a Carolina Sánchez por su entera colaboración.

A mi hija por quien realizaré este sueño para labrarle un gran futuro.

Agradecimientos.

Le agradezco a Dios porque sin su ayuda no hubiese podido realizar este sueño.

Son muchas las personas a quienes debo mis agradecimientos, por haberme colaborado en este proceso, entre ellas destaco a: todo el Cuerpo Docente de la CORPORACIÓN UNIVERSITARIA TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR, quienes me acompañaron en toda mi carrera. A la empresa INMUNIZADORA COLOMBIA S.A., por su colaboración.

Al ingeniero Javier Arbeláez por su orientación en este trabajo de grado, y por último a mis compañeros que siempre los recordaré y llevaré en el alma.

Víctor Raúl Feria.

CONTENIDO

INTRODUCCION

1. RESEÑA HISTÓRICA.....	2
1.1 IMPORTANCIA DE LA MADERA.....	2
1.2 DESARROLLO HISTÓRICO DE LA MADERA.....	3
1.3 ESTRUCTURA ANATÓMICA DE LA MADERA.....	5
1.3.1 La Corteza.....	5
1.3.2 El Cambium.....	5
1.3.3 La Albura.....	6
1.3.4 Agua en la Madera.....	6
1.3.5 Humedad en la Madera.....	6
1.3.6 Agua Libre.....	7
1.3.7 Agua de Saturación e Higroscópica.....	7
1.3.8 Agua de Constitución.....	8
1.3.9 Determinación del Contenido de la Humedad en la Madera.....	8
1.4 MÉTODOS DE SECADO.....	9
1.4.1 Métodos de Secado en Estufa.....	9
1.4.2 Métodos Eléctricos.....	11
1.5 DENSIDAD EN LA MADERA.....	14
1.5.1 Densidad.....	15
1.5.2 Densidad Relativa.....	16
1.5.3 Relación Entre Densidad y Densidad Relativa.....	17
1.5.4 Porosidad de la Madera Anhidra.....	18
1.5.5 Máximo Contenido Posible de Agua.....	19
1.5.6 Bases Físicas del Secado de la Madera.....	21
1.5.7 Temperatura.....	21
2. HUMEDAD DEL AIRE.....	24
2.1 CARACTERÍSTICAS DEL AIRE.....	24
2.1.1 Presión Parcial.....	24
2.1.2 Presión del Vapor Saturado.....	25

2.1.3	Tabla Presión Vapor Saturado	27
2.2	HUMEDAD RELATIVA.....	28
2.2.1	Medición de la Humedad Relativa.....	29
2.2.2	Control de la Humedad Relativa.....	31
2.2.3	Relación entre Humedad Relativa del Aire y Humedad de la Madera	33
2.3	VELOCIDAD DEL AIRE.....	34
2.4	CONTENIDO DE HUMEDAD DE EQUILIBRIO	37
2.4.1	Precisiones de la Humead de Equilibrio.....	37
2.4.2	Fenómeno de Histéresis.....	38
2.4.3	Importancia de la Humedad de Equilibrio.....	40
2.4.4	Gradiente de Humedad de la Madera y Gradiente de Secado	41
2.4.4.1	Gradiente de Humedad de la Madera	41
2.4.4.2	Gradiente de Secado.....	43
2.4.4.3	Desarrollo del Proceso de Secado de la Madera.....	44
3.	TECNOLOGÍA DEL SECADO DE MADERA	46
3.1	SECADO NATURAL.....	48
3.1.1	La Acción del Aire	48
3.1.2	Velocidad del Secado y sus Factores	49
3.1.2.1	El Peso Especifico del Tipo de Madera.....	50
3.1.2.2	Espesor de la Madera.....	50
3.1.2.3	Condiciones Climáticas	51
3.1.2.4	Método de Apilado.....	51
3.1.2.5	El Piso de Patio de Secado.....	52
3.1.2.6	Ventajas y Limitaciones del Secado al Aire Libre.....	52
3.2	SECADO ARTIFICIAL	52
3.2.1	Secado Artificial Convencional	54
3.2.2	Secado a Bajas Temperaturas o Presecado	55
3.2.3	Sistemas Comunes de Presecado	55
3.2.4	Procedimiento de Secado.....	57
3.2.5	Ventajas del Secado Artificial.....	57
3.2.6	Secado a Temperaturas Normales	57
3.2.7	Instalaciones de Secado	58
3.2.8	Cámaras de Secado.....	58
3.3	SISTEMAS DE VENTILACIÓN	59

3.3.1	Ventilación Lateral.....	60
3.4	SISTEMAS DE CALEFACCIÓN	61
3.4.1	Vapor a Baja Presión.....	61
3.4.2	Vapor a Mediana y Alta Presión	62
3.4.3	Agua Caliente a Baja Presión	62
3.4.4	Calentamiento Directo con Desperdicios de Madera.....	62
3.4.5	Calefacción Eléctrica.....	63
3.4.6	Secadero con Intercambiador de Calor Calentado.....	63
3.4.7	Calentamiento a Base de Aceite Térmico.....	63
3.5	CONSTRUCCIÓN DE UNA CÁMARA DE SECADO	64
3.5.1	Los Cimientos	65
3.5.2	El Piso.....	65
3.5.3	Las Paredes	65
3.5.4	El Techo.....	66
3.5.5	El Falso Techo	67
3.5.6	Los Pasillos Laterales	67
3.5.7	Las Puertas.....	68
3.5.8	Las Ventilás	68
3.5.9	Cámaras Metálicas	68
3.6	EQUIPAMIENTO DE LAS CÁMARAS DE SECADO	69
3.6.1	Medios De Calentamiento	69
3.6.2	Dispositivos Para Control De La Temperatura.....	72
3.6.3	Dispositivos Para Control De La Humedad Relativa.....	72
3.6.4	Secado a Altas Temperaturas.....	73
3.6.5	Secado Con Vapor Sobrecalentado.....	76
3.6.6	Secado Por Condensación.....	77
3.6.7	Ventajas Del Secado Y Condensación	79
3.6.8	Desventajas del Secado por Condensación.....	80
4.	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA CÁMARA PARA SECADO DE MADERA.....	82
4.1	DIMENSIONAMIENTO DE LA CÁMARA	82
4.1.1	Determinación del Volumen de la Cámara.....	83
4.1.2	Volumen de Madera a Secar	84
4.1.3	Volumen de la Cámara	84

4.1.4	Volumen del Techo	84
4.1.5	Calculo del Peso de la Madera.....	85
4.1.6	Calculo de la Cantidad de Agua a Evaporar	86
4.1.7	Calculo del Aire Dentro de la Cámara	87
4.1.8	Calculo de la Carga de Calor	87
4.2	CARGA DE CALOR POR AIRE.....	88
4.2.1	Carga de Calor de la Madera que Soporta el Techo.....	89
4.2.2	Carga del Calor Para Calentar Paredes.....	90
4.2.3	Calculo del Espesor del Aislante	91
4.3	PERDIDA DE CALOR POR LAS PUERTAS	93
4.3.1	Área de la Aleta.....	95
4.3.2	Perímetro Proyectado	96
4.3.3	Caída de Presión.....	102
4.4	SELECCIÓN DE LOS VENTILADORES.....	103
4.4.1	Dimensionamiento de las Ventilás.....	106
4.5	ELECCIÓN DE LA BOMBA PARA CIRCULACIÓN DEL ACEITE TÉRMICO	107
4.5.1	Características de la Bomba Seleccionada	113
4.6	CALDERA DE ACEITE TÉRMICO	113
4.7	SISTEMA ELÉCTRICO	114
5.	MANUAL DE OPERACIONES	117
5.1	PROCEDIMIENTO DE OPERACIÓN	117
5.1.2	Fichas de Mantenimiento y Tiempos Muertos.....	120
5.1.3	Reporte Sobre Rendimiento.....	120
5.1.4	Control de Calidad	121
6.	MANTENIMIENTO DE LA CÁMARA DE SECADO	122
6.1	TUBERÍA.....	122
6.2	VÁLVULAS.....	123
6.3	INTERCAMBIADORES	123
6.4	BOMBA	124
6.5	VENTILADORES	125
6.6	INSPECCIÓN DE MOTORES ELÉCTRICOS	126
6.7	PAREDES Y PISOS	126
6.8	VENTILAS.....	127

6.9	CALDERA	127
6.10	CHIMENEA	128
6.11	ORDEN DE SERVICIO.....	129
6.12	HOJA DE VIDA DE LOS EQUIPOS.....	130
6.13	HOJA TÉCNICA	130
7.	EVALUACIÓN ECONÓMICA	131
7.1	COSTOS DE FABRICACIÓN.....	132
7.2	COSTOS DE MANTENIMIENTO	134
7.3	COSTOS DE OPERACIÓN.....	135
7.4	COSTO ABASTECIMIENTO CALDERA	136
7.5	COSTO SUPERVISIÓN Y MEDICIÓN MENSUAL.....	136
7.6	COSTO ENERGÍA DE CÁMARA	136
7.7	COSTO MATERIA PRIMA PARA PRODUCCIÓN	136
7.8	VENTAS	137
7.9	COSTO SECADO AL AIRE LIBRE.....	137
7.10	COSTO DE TRANSPORTE AL PATIO DE SECADO	137
7.11	COSTO MATERIA PRIMA PARA PRODUCCIÓN	137
7.12	VENTAS MENSUAL.....	138
7.13	COMPARACIÓN DE ALTERNATIVAS.....	138
7.14	COSTO CÁMARA DE SECADO.....	138
7.15	COSTO DE SECADO AL AIRE LIBRE	139
8.	CONCLUSIONES	141
9.	RECOMENDACIONES	142
10.	BIBLIOGRAFÍA	143
	ANEXOS.	

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 Estructura Anatómica de la Madera	5
Figura 2 Conductividad vs. HR.....	12
Figura 3 Humedad de la Madera.....	13
Figura 4 Efecto del Contenido de la Humedad.....	18
Figura 5 Higrómetro.....	29
Figura 6 Psicómetro.....	30
Figura 7 Velocidad del Aire.....	34
Figura 8 Perfil de Velocidad de la Corriente de Aire.....	35
Figura 9 Humedad de Equilibrio.....	38
Figura 10 Curva de Histéresis.....	39
Figura 11 Contenido de Humedad de la Madera.....	41
Figura 12 Distribución del Contenido de la Humedad.....	42
Figura 13 Curva Teórica de secado.....	45
Figura 14 Variación de CH en el Apilado	49
Figura 15 Sistema de Presecado.	56
Figura 16 Medidor de Velocidad.....	59
Figura 17 Ventiladores Axiales	61
Figura 18 Caldera de Aceite Térmico.....	64
Figura 19 Radiadores.....	70
Figura 20 Humedad Relativa vs. Temperatura de Secado.....	81
Figura 21 Dimensionamiento del Cuarto.....	82
Figura 22 Separación de los Carros.....	83
Figura 23 Números de Carros dentro del Cuarto.....	84
Figura 24 Volumen del Techo.....	85
Figura 25 Espesor del Aislante	91
Figura 26 Variación del Calor	92
Figura 27 Puertas.....	93
Figura 28 Aislante.....	93
Figura 29 Diagrama de Flujos	94

Figura 30 Diagrama de Aleta	95
Figura 31 Perímetro de la Aleta	96
Figura 32 Obstrucción de Flujos	99
Figura 33 Caída de Presión	102
Figura 34 Circuito de Potencia	116
Figura 35 Circuito de Control	116
Figura 36 Diagrama de Costo de cámara de Secado	120
Figura 37 Diagrama de Costo de Secado al Aire Libre	121

LISTA DE CUADRO

	Pág.
Tabla 1. Tabla Presión del Vapor Saturado.....	27
Tabla 2. Característica de la Bomba Seleccionada	111
Tabla 3. Costos de Fabricación	129
Tabla 4. Costos de Mantenimiento	131

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA CÁMARA PARA EL SECADO DE MADERA

OBJETIVO GENERAL

Diseñar y Construir una Cámara para el secado de madera para la empresa INMUNIZADORA COLOMBIA, con el fin de optimizar el proceso de secado de la madera contribuyendo al aumento de la producción y mejoramiento de la calidad.

METODOLOGIA

En nuestro proyecto de tesis la información primaria se recopiló de los datos obtenidos en aserríos y en los libros de madera, acerca del procedimiento utilizado para secar la madera y el tiempo que se estimaba para este proceso.

La información secundaria parte de la información obtenida por el gerente de la empresa INMUNIZADORA COLOMBIA y de algún personal técnico que tiene conocimientos acerca de la madera y su tratamiento.

Todo esto se hizo basándonos en los parámetros técnicos que nos ofrecen los catálogos de secado de madera y de los conocimientos obtenidos por nosotros en las investigaciones realizadas en lo que respecta a los procedimientos de los hornos secadores de madera.

RESULTADOS

Terminado este proyecto diseño y construcción de una cámara de secado en madera, se han logrado los objetivos propuestos en la investigación, y la empresa INMUNIZADORA COLOMBIA S.A. a quedado dotada de una obra que le permitirá cubrir la demanda de producción de estación de madera de pino que se venía presentando, en una forma rápida y con unas condiciones optimas de calidad. Podemos concluir que los factores que más influyen en el proceso de secado garantizarán la eficiencia de la cámara y le dará consistencia en cuanto a calidad, otorgándole los resultados esperados por la empresa en la inversión hecha en este proyecto.

DIRECTOR: JAVIER ARBELÁEZ GÓMEZ – Ingeniero Químico

INTRODUCCION

Sin duda alguna la elaboración del diseño y construcción de la cámara de secado para la empresa INMUNIZADORA COLOMBIA, es un avance tecnológico de la implantación que requiere el tratamiento del secado de la madera en condiciones ideales.

Esta idea nació de la necesidad que existe en la empresa INMUNIZADORA COLOMBIA de optimizar el proceso de secado con la finalidad de aumentar la producción de madera seca, lista para el proceso de inmunización.

Esta situación permite aplicar metodológicamente los conocimientos prácticos y teóricos de la ingeniería, para optar por un mejoramiento en la producción y en la calidad de la madera que se procesa en la empresa.

Es lógico que el avance que la empresa adquiere con el diseño de la cámara de secado, es superior con respecto a las empresas que secan la madera con métodos artesanales o simplemente al aire libre.

La diferencia entre ambos corresponde al tiempo de secado. Hay que tener en cuenta que la innovación en el tiempo de secado es debido a las condiciones climáticas planteadas en el cuarto.

Es así, que el diseño y construcción de la cámara de secado se aumentara sustancialmente la producción de la empresa y mejorará la eficiencia de esta con respecto a la demanda existente en ella.

1. RESEÑA HISTÓRICA

1.1 IMPORTANCIA DE LA MADERA

Desde tiempos muy remotos el concepto construcción se asocia generalmente a los materiales; ladrillo, acero y cemento, lo que indica que el hombre desconoció la importancia de la madera en la construcción, y algo más grave quizás representa desconfianza. Esto realmente se debe al desconocimiento de las técnicas existentes para alargarle la vida útil a la madera en sus condiciones de usos.

A partir de estas técnicas el hombre utilizó la madera en construcciones con un margen de duración de contenedores de años, utilizando las medidas de protección adecuadas.

Esto demuestra las ventajas ofrecidas por la madera ya que para trabajar con ella se utilizan herramientas sencillas, su transporte es sencillo, tiene alta resistencia a los esfuerzos mecánicos, tiene su propiedad de aislante térmico y acústico y se encuentra en abundancia en la tierra y además es un recurso renovable.

Las crecientes exigencias de la demanda de madera contribuyeron a los incrementos en los costos de los otros materiales de construcción, teniendo en cuenta que la madera es

más económica y es mucho más útil en construcciones de vivienda, viendo el incremento en la población andina.

1.2 DESARROLLO HISTORICO DE LA MADERA

El hombre desde sus comienzos ha tratado de utilizar la madera en muchas necesidades y esto ha permitido que el hombre evitara que la madera se alterara o sufriera el fenómeno de pudrición con medios que tuviese a su alcancé, utilizando el conocimiento empírico que desde el comienzo fue muy rudimentario.

Los Egipcios utilizaban la madera como elemento para extraer resinas que sirvieran para preservar el material orgánico para la momificación de cuerpos embalsamados, los Chinos sumergían la madera en agua salada antes de usarla en sus edificaciones, también se ha demostrado que muchas maderas antiguas eran carbonizadas superficialmente como método de preservación de esta, como es el caso del templo de Diana en efeso que fue construido sobre pilotes de madera. Los Egipcios para construir sus sarcófagos, emplearon una especie de madera muy durable (ficus sycamorus), y para prolongar su vida útil utilizaban aceites naturales.

Los aceites más comunes para preservar la madera eran el aceite de cedro, oliva, alerce, ciprés y nardo que evitaban el fenómeno de pudrición.

Los Romanos fueron los inventores de los retardantes de fuego y trataban la madera con alumbre, lo que daba mas resistencia, pero después de la caída del imperio romano no se presento ningún avance en la preservación de la madera.

Durante la conquista de América los Españoles aprendieron de los indígenas a usar resinas y cauchos para proteger la madera.

En el siglo XVI, Inglaterra y Holanda tuvieron la mayor marina mercante pero sus flotas sufrían de pudrición y estragos causados por los perforadores marinos, al igual que los Españoles que tuvieron en el año 1590 alrededor de 100 embarcaciones destruidas por causa de los fenómenos de pudrición de la madera. El costo que se tenía al reparar estas embarcaciones fue un factor importante que condujo a buscar métodos de preservación de la madera.

En 1607 el químico Joham Glauber, obtuvo un método de preservar la madera, donde esta era carbonizada superficialmente, luego recubierta con alquitrán y finalmente sumergida en ácido Piroligneo. Después en los 100 años siguientes fueron aprobados los aceites, las gomas, el látex y el alquitrán como preservantes de la madera.

En el siglo XVIII se emplearon algunos productos químicos y en 1705 Homberg científico francés recomendó el uso de bicloruro de mercurio como preservantes contra insectos.

En la actualidad la marina y las empresas que contribuyen con madera, han ganado un gran mercado mundial, gracias a las diversas técnicas de preservación de ella y garantizando la gran duración de esta y mejorando sus propiedades mecánicas, y por todo tratando de evitar las filtraciones de hongos y bacterias que maltratan y pudren la madera.

1.3 ESTRUCTURA ANATOMICA DE LA MADERA

La madera por ser un material biológico de origen vegetal se alimenta con agua y sustancias nutritivas del suelo, el tronco de los árboles sirve de transporte para el proceso de alimentación.

Estructura Anatómica de la Madera

Todas las funciones de alimentación y la forma de hacerlas determinan la naturaleza de la madera, caracterizando la porosidad, la elevada resistencia mecánica, su peso, su humedad y otras características que la hacen diferentes a los otros materiales de construcción.

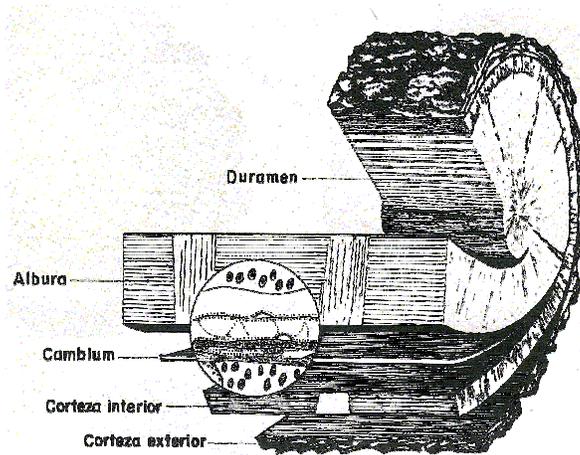


Figura 1

El tronco está formado por la corteza, el Cambium, albura, duramen y en el centro un corazón blando llamado medula.

1.3.1 La Corteza. Es la cubierta protectora del árbol y puede variar el grueso de ella pero siempre tendrá la propiedad impermeable. La parte interior de la corteza se llama floema y se encarga del transporte del agua y de los alimentos fabricados por las hojas.

1.3.2 El Cambium. Es una capa microscópica constituida por células y paredes muy delgadas entre la corteza y la madera. El Cambium produce mayor porción de madera hacia el interior del árbol y en menor proporción a la corteza, de esta manera aumenta el diámetro del árbol.

1.3.3 La Albura. Es un conjunto de células vivas y el Duramen es un conjunto de células muertas, estas conforman un tejido complejo denominado Xilema. En la formación de la madera se distinguen paredes delgadas y colores claros y otras gruesas y oscuras, estas son zonas de crecimiento denominadas anillos de crecimiento y son diferentes dependiendo del tipo de especie de árbol.

Esta estructura hace de la madera un material anisótropo con propiedades y características diferentes en los tres planos de cortes que son radial, transversal y longitudinal.

1.3.4 Agua en la Madera. El agua en la madera es una característica esencial de cada especie, esta define el peso, la cantidad de humedad y la calidad de la madera en cuanto a dureza y resistencia, por eso es que no toda madera sirve para todo tipo de utilización.

1.3.5 Humedad en la Madera. Cuando la madera es cortada de los árboles tiene un gran contenido de agua dependiendo de la época del año, la región y la especie. Las maderas livianas y porosas contienen mayor cantidad de humedad que las livianas.

La relación agua-madera esta sujeta a la calidad de las fibras y el peso específico de la madera, por lo cual el Duramen no permite contenidos elevados de humedad, mientras

que la Albura por ser liviana y porosa acumula hasta 100% y más de agua de su peso normal y hasta 200% mientras más liviana sea la madera.

El agua en la madera se encuentra en diferentes formas tales como; agua libre, agua de saturación y agua de constitución.

1.3.6 Agua Libre. Es el agua que se encuentra ocupando las cavidades celulares o lumen de los elementos vasculares, dándole a la madera la condición de coloración verde. La cantidad de agua libre puede estar limitada por el volumen de poros, cuando la madera se somete al secado, el agua libre en los poros de la madera se va perdiendo por evaporación, hasta que no contenga mas agua de este tipo. Al punto de evaporación total de agua libre se le llama punto de saturación de las fibras que corresponde a un contenido de humedad entre el 21% y 32%; en este punto las cavidades de las paredes están vacías y las células saturadas.

La madera en este punto no experimenta cambios dimensionales, ni alteraciones en sus propiedades mecánicas, solo se producen modificaciones en las propiedades físico-mecánicas, eléctricas y la tratabilidad de esta.

1.3.7 Agua de Saturación o Higroscópica. Es aquella que se encuentra en las paredes celulares, llamada también agua de imbibición o agua absorbida. Cuando se esta secando la madera y ya ha perdido el agua libre por evaporación, la eliminación de la humedad ocurre con mayor lentitud, hasta llegar a un estado de equilibrio higroscópico con la humedad relativa de la atmósfera circundante. En la mayoría de las especies de maderas el equilibrio higroscópico esta entre el 12% y 18% del contenido de humedad, dependiendo del sitio donde se realice el secado.

Cuando se desea conseguir contenidos de humedad por debajo del 12% se realizan secados artificiales utilizando hornos o cámaras de secado artificial que facilitan el secado teniendo en cuenta que el gradiente de temperatura puede ser estable y las condiciones en que se realiza el secado permiten mayor calidad en la madera.

1.3.8 Agua de Constitución. Es el agua que forma parte de la materia celular de la madera y que no puede ser eliminada utilizando las técnicas normales o artesanales de secado; su eliminación total implicaría la destrucción de la madera.

1.3.9 Determinación del Contenido de Humedad en la Madera. La determinación del contenido de humedad en la madera se realiza teniendo en cuenta los valores de agua libre y de saturación los cuales identificarán el peso de la madera en sí. Considerando que para que la madera obtenga su peso constante, ahí que secarla a unos 100° c. El contenido de humedad se determina como el peso de la cantidad de agua presente en una pieza de madera sin secar y el peso de la madera será al horno.

Su valor numérico se expresa en porcentajes y se eleva con la siguiente fórmula:

$$CH = \frac{Ph - Ps}{Ps} * 100\%$$

donde :

CH = humedad de la madera expresada en porcentajes de su peso anhidro.

Ph = peso de la madera en estado húmedo, peso inicial.

Ps = peso de la madera en estado anhidro, o peso final o constante.

En algunas empresas calculan la humedad de la madera en función del peso húmedo o del peso inicial con la siguiente fórmula:

$$CH_1 = \frac{Ph - Ps}{Ph} * 100\%$$

A partir de estas fórmulas se logra realizar una relación entre ellas de la siguiente manera:

$$CH = \frac{100CH_1}{100 - CH_1} \quad Y \quad CH_1 = \frac{100CH}{100 + CH}$$

1.4 METODOS DE SECADO

Todas estas fórmulas que determinan el contenido de humedad en la madera se utilizan en métodos tradicionales de secado como son el secado de estufa y los métodos eléctricos con los que utilizan detectores de humedad y a nivel industrial son muchos más rápidos.

Otros procedimientos como decantación al vacío mediante sustancia higroscópicas, destilación de la madera, expulsión directa del agua por presión, centrifugación, uso del alcohol y sustancias asociadas son muy especializadas y se emplean en la investigación y son de poca utilidad.

1.4.1 Métodos de Secado en Estufa. Es uno de los métodos más exactos y con resultados satisfactorios para determinar el contenido de agua en la madera.

Para el éxito de este método, debe seleccionarse bien el tipo de madera para secar y esta debe permitir una evaluación objetiva que agilice el cálculo del tiempo de secado para los próximos procedimientos.

El procedimiento a seguir es el siguiente:

*** Obtención de probetas o muestras de control:**

Se toma un listón de muestra y se coloca en dirección del grano. Las muestras deben estar sanas y libres de defectos y las herramientas de corte deben estar bien afiladas para evitar pérdidas de humedad por recalentamiento en la superficie de corte.

*** Determinación del peso húmedo o peso inicial:**

Después de cortar el listón de prueba debe pesarse en una balanza para determinar el peso inicial de la madera a secar.

*** Secado de las probetas hasta el peso constante:**

Luego se introduce las probetas de madera en la estufa para proceder con el secado. Se recomienda el uso de estufas regulables con buena circulación de aire, para tener buen control del nivel de temperatura, para evitar torceduras y agrietamientos en la madera.

*** Determinación del peso seco:**

Para determinar el peso final se pesa la madera después de secada y utilizan las formulas de porcentajes de humedad, se obtiene el porcentaje de humedad y el peso final que tiene la madera secada.

1.4.2 Métodos Eléctricos. La medición de la humedad en la madera por métodos eléctricos tiene su base en las diferentes propiedades eléctricas de la madera seca y de la húmeda, relacionando su conductividad eléctrica y la constante dieléctrica de la madera y su pérdida de potencia.

Es sabido que la resistencia eléctrica y las propiedades dieléctricas en la madera dependen de su contenido de humedad (6 a 25% CH). Existe una relación casi lineal entre el logaritmo de la Resistencia Eléctrica y el contenido de humedad de la madera cuando ella esta seca en el punto de saturación de las fibras, estamos hablando de un rango del 30 al 0% de CH.

La Resistencia Eléctrica aumenta 1 millón de veces en estado de saturación, mientras que el aumento en CH hasta la saturación completa ocasiona una disminución de la resistencia eléctrica de solo 5 veces.

Conductividad vs. HR.

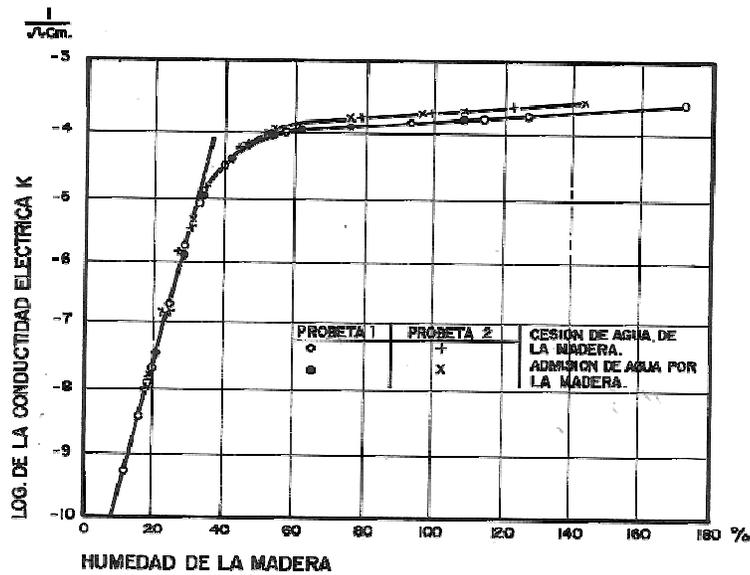


Figura 2

Este método se distingue dos tipos de medidores eléctricos para determinar CH.

Uno de ellos se deduce el CH por su resistencia eléctrica y el otro por sus propiedades dieléctricas.

Las constantes dieléctricas diferentes del material leñoso seco y del agua ocasionan una variación en las propiedades en función del contenido de agua en la madera, que puede ser captado por el detector y los que se le aplica una tensión alterna de alta frecuencia, el detector que indica mayor intensidad de corriente circundante a ese, se calibra para que indique el CH de la madera.

La temperatura afecta los valores de la Resistencia Eléctrica por lo que la lectura debe ser corregida con una tabla que se muestra en la figura 1.13.

Para una relación casi lineal de CH con la Resistencia Eléctrica entre 6 y 25% de humedad, esta representada por el modo aproximado por la siguiente ecuación logarítmica;

$$\text{Log } r = 13.25 - 0.32 \text{ CH}$$

Log r = logaritmo decimal de la Resistencia Eléctrica a través del gramo, expresada en ohmios.

CH = contenido de humedad en la madera, expresado en porcentajes.

Los buenos detectores de humedad funcionan entre 6 y 25% de humedad con un margen de mas o menos 2% de desviación aceptable para todos los casos.

Humedad de la Madera.

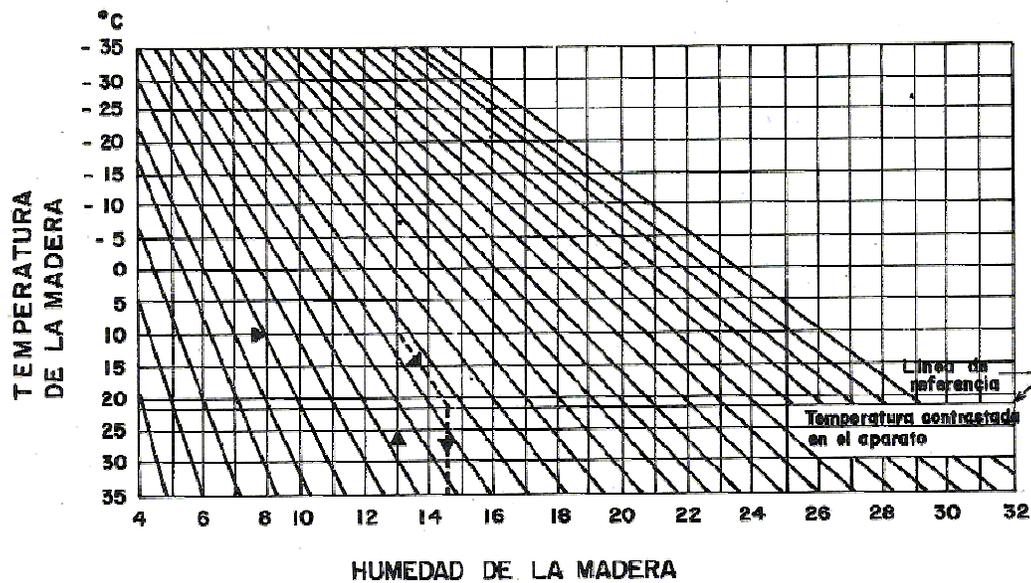


Figura 3

1.5 DENSIDAD DE LA MADERA

Por ser la madera un material celular poroso, es de mucha importancia el conocer la cantidad de sustancia sólida que forman las paredes, por lo que indica que a mayor cantidad de material sólida tenga dicho tipo de madera, sus propiedades mecánicas serán mejores que los tipos de maderas porosas.

Además las características de trabajo serán mejores y en cuanto a su secado, tendrá un comportamiento estable gracias a sus propiedades eléctricas y en tal caso a sus propiedades térmicas que ayudaran a evacuar rápidamente el agua que se encuentra en la madera, debido a la cantidad de humedad que tenga.

1.5.1 Densidad. La densidad en la madera se define como la masa por unidad de volumen a un determinado contenido de humedad. Esta densidad se puede obtener realizando cálculos que se derivan de la siguiente formula:

$$D = \frac{M}{V}$$

donde:

D = densidad en g/cm³

M = masa de un elemento de madera a una determinada humedad.

V = volumen del elemento con igual contenido de humedad.

Los estudios realizados han revelado que cuando aumenta considerablemente el contenido de humedad en la madera, por ende, también trae un aumento en proporción

mayor en su masa que en su volumen. Esto indica que la densidad aumenta directamente proporcional al aumento en la humedad.

Teniendo en cuenta el punto de saturación de las fibras, el incremento de la densidad es mayor, debido a la estabilidad del volumen de la madera, por cuanto se considera que por encima del punto de saturación de las fibras el fenómeno de hinchazón de la madera cesa y la madera ya no sufre expansiones en su volumen.

Debido a los cambios y variaciones que sufre el volumen y la masa de la madera por el contenido de humedad, enunciaremos las condiciones en que se puede calcular la densidad para efectos de comparación:

$$DA = \text{densidad anhidra} = \frac{m_0}{v_0}$$

$$DN = \text{densidad normal} = \frac{m_{12\%}}{v_{12\%}}$$

$$DF = \text{densidad en el PSF} = \frac{m_f}{v_f}$$

Donde :

M_0 = masa seca al horno

$V_{12\%}$ = volumen

V_0 = volumen seco al horno

M_f = masa al 30% de CH

$M_{12\%}$ = masa al 12% de CH

V_f = volumen al 30% de CH

1.5.2 Densidad Relativa. La densidad relativa en la madera es el cociente entre la densidad de la misma y la densidad del agua. Numéricamente es igual al cociente entre la masa de la pieza y la masa del agua desplazada por esa misma pieza de madera.

Si bien en física la densidad se basa tanto en el volumen como en la masa, con el mismo contenido de humedad, en el campo de la investigación suele tomarse los datos de la madera seca al horno y el volumen con un cierto contenido de humedad.

Matemáticamente la densidad relativa se puede expresar a través de la siguiente formulación matemática según el criterio señalado por la SIAU 1984:

$$DR = \frac{M_0}{V * Da}$$

DR = Densidad Relativa

M_0 = Masa seca al horno, en gramos

V = volumen a un determinado contenido de humedad

Da = Densidad del agua en condiciones normales = 1.0g/cm^3

Tomando como relación esta formula, expresaremos la Densidad Relativa de la siguiente manera:

DRA = Densidad Relativa Anhidra $\frac{m_0}{V_0 * Da}$

DRN = Densidad Relativa Normal $\frac{m_0}{V_{12\%} * Da}$

DRB = Densidad Relativa Básica $\frac{m_0}{V_f * Da}$

Por lo cual el aumento en la humedad esta dado en el rango de ($0\% \leq CH \leq 30\%$), del contenido de agua, y esto conduce a un aumento en el volumen debido al hinchazón de la madera y la humedad relativa disminuye.

Es de saber que en el punto de saturación de las fibras, la densidad llega a su valor mínimo (DRB) y de allí en adelante permanece constante para contenidos de humedad mucho mayores.

1.5.3 Relación Entre Densidad y Densidad Relativa. Una relación entre la densidad y la densidad relativa de la madera puede derivarse de la siguiente formula matemática:

$$CH = \frac{m - m_0}{m_0} * 100$$

donde:

CH = Contenido de humedad en porcentaje

M = Masa con un cierto contenido de humedad o masa inicial

M₀ = Masa seca al horno

Transformándola algebraicamente se obtiene:

$$M = m_0 (1 + 0.01CH)$$

Por lo tanto:
$$D = \frac{m}{v} = \frac{m_0(1 + 0.01CH)}{v}$$

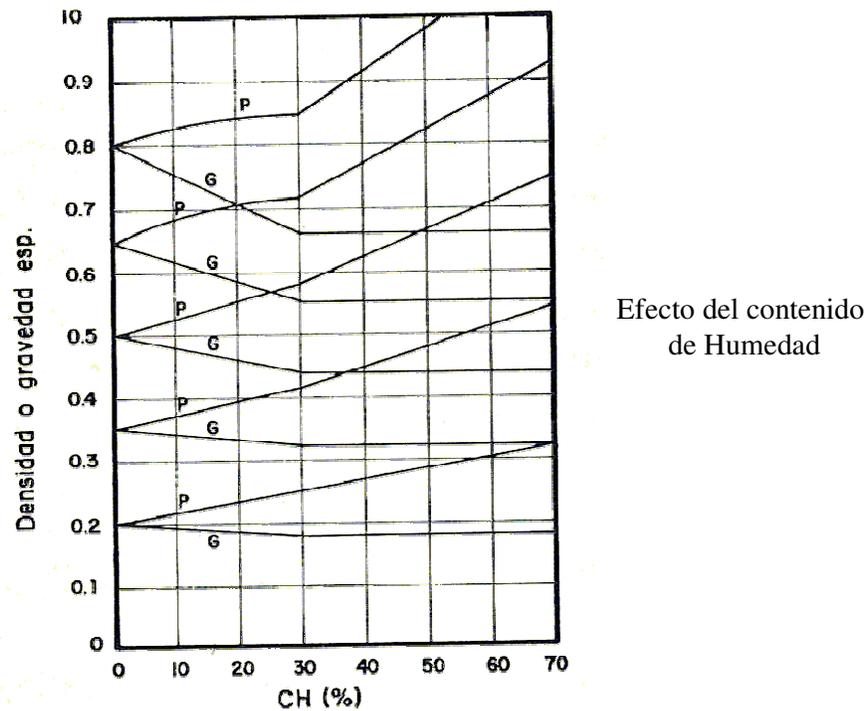
Pero:
$$\frac{m_0}{v} = Dr * Da$$

Entonces:
$$D = DR (1 + 0.01CH) Da$$

Donde se puede concluir que la densidad y la densidad relativa son numéricamente iguales para la condición que la madera sea secada ($DA = DRA$), y se mide en g/cm^3 .

Por eso cuando el contenido de humedad aumenta, la densidad será numéricamente mayor que la densidad relativa y para estos efectos mostramos la siguiente tabla:

Efecto del Contenido de la Humedad.



Efecto del contenido de Humedad

Figura 4

1.5.4 Porosidad de la Madera Anhidra. Cuando la madera es secada al horno o en cámaras de secado, la porción del volumen poroso de la pieza es igual al volumen exterior de la madera menos el volumen de la materia sólida.

Esto se puede expresar con la siguiente formula:

$$V_0 = 1 = V_m + V_p \quad (1.9)$$

Donde:

V_o = volumen exterior de la madera en condición seca al horno por unidad.

V_m = volumen de materia sólida, expresado como una fracción del volumen exterior.

V_p = volumen poroso, expresado también como una fracción del volumen exterior de la madera.

Donde el calculo del volumen poroso de una pieza de madera seca es:

$$V_p = 1 - V_m \quad (1.9^a)$$

$$\text{Pero } V_m = \frac{DA}{DMS} \quad (1.9b)$$

$$\text{Donde } V_m = \frac{DA}{1.50} = 0.667 DA$$

$$\text{Por lo tanto } V_p = 1 - 0.667 DA$$

$$V_p = (1 - 0.667 DA) * 100\%$$

Pero como la condición es que la madera es seca al horno, (entonces $DA = DRA$), tendremos que: $V_p = 1 - 0.667 DRA$

1.5.5 Máximo Contenido Posible de Agua. Cuando una pieza de madera esta totalmente sumergida en agua, el valor del contenido de humedad estará representada por la cantidad de agua giroscópica, fijada en un 30%, mas la cantidad de agua libre localizada en los poros.

Matemáticamente el valor del contenido de agua máximo se expresa de la siguiente forma:

$$CH_{\max} = 0.30 + \frac{V_p * Da}{DA}$$

$$CH_{\max} = 0.30 + \frac{(1 - DA/1.5)Da}{DA}$$

$$CH_{\max} = 0.30 + \frac{1.5 - DA}{1.5DA}$$

$$CH_{\max} = \left(0.30 + \frac{1.5 - DA}{1.5DA} \right) * 100\%$$

Donde:

V_p = Volumen poroso

Da = Densidad de agua = 1.0g/cm^3

DA = Densidad Anhidra

El CH_{\max} también puede expresarse en función de la densidad relativa básica (DRB) de la siguiente manera:

$$DA = \frac{m_0}{v_0} = \frac{m_0}{V_f(1 - 0.30DRB)} = \frac{DRB}{1 - 0.30DRB}$$

Por lo tanto:

$$CH_{\max} = 0.30 + \frac{1.5 - DA}{1.5DA}$$

$$CH_{\max} = 0.30 + \frac{1.5DRB/(1 - 0.30DRB)}{1.5DRB/(1 - 0.30DRB)}$$

$$CH_{\max} = \frac{1.5 - DRB}{1.5DRB}$$

$$CH_{\max} = \frac{1.5 - DRB}{1.5DRB} * 100\%$$

Hay que agregar que sin duda cuanto más densa es la madera, menor es el contenido máximo de agua posible en la madera.

1.5.6 Bases Físicas del Secado de la Madera. Tanto en el secado de estufa como en el secado al aire libre, el agua que esta contenida en la madera se remueve de la superficie por evaporación. La velocidad de evaporación del agua en la madera es controlada por la temperatura, la humedad del ambiente y la velocidad del aire que pasa a través de la pila de secado. Por eso para entender el proceso de secado de la madera es muy importante familiarizarse con las leyes de la evaporación y las relaciones que tienen con las variables de control del proceso. El propósito es analizar los procesos termodinámicos y de transferencia de calor necesarios para la realización de un buen proceso de secado, y de allí sacar las relaciones que existen entre los procesos de secado.

1.5.7 Temperatura. El calor es la fuente de energía que le proporcionan a las moléculas de agua en la madera obtener energía cinética para evaporación. La velocidad de evaporación depende de la cantidad de energía suministrada por unidad de tiempo y de la capacidad del medio (aire), para absorber la humedad liberada por la madera.

Por lo anterior podemos concluir, que la temperatura es un factor de aceleración de la evaporación, ya que, cuanto más elevada sea la temperatura del ambiente que rodea la madera, más intensa será la evaporación, puesto que el aire podrá absorber mas humedad.

En el interior de la madera, la temperatura también condiciona la velocidad del movimiento del agua, aumentando la circulación con un incremento en temperatura. Así, a 60°C la velocidad del movimiento del agua al interior de la madera es aproximadamente 4 o 5 veces mayor que a 20°C.

Como puede verse en el secado en estufa, la energía o calor se transmite por “CONVECCION”, siendo este fenómeno predominante en el proceso.

Por esta razón el efecto que podía producir una diferencia significativa entre la temperatura del aire en circulación y la de la superficie de la madera, prácticamente se anula durante el secado en CAMARAS, por cuanto con este proceso en la cámara se elimina la radiación, que es una de las causas de deterioro en la madera.

En el secado al aire libre, cuando la madera esta expuesta a la radiación directa del sol, la temperatura superficial de la pieza de madera puede llegar a ser muy superior a la temperatura del aire en circulación. Esta situación genera condiciones de secado muy

severas, que se manifiestan en defectos en la madera como torceduras, grietas, rajaduras en los casos extremos, etc.

Hay que tener en cuenta que la temperatura y la humedad relativa del aire son factores decisivos para el secado, ya que estos elementos determinan el clima dentro de la cámara junto con el equilibrio que brinda el contenido de humedad de la madera.

El control de la temperatura constituye un factor muy importante para muchas especies de madera, como por ejemplo, para maderas livianas la temperatura máxima alcanza los

70 a 90°C para una buena calidad del secado; para maderas semipesadas su temperatura puede ser entre 60 a 80°C, y para maderas verdes y recién aserradas con un contenido de humedad del 30% se deben secar a bajas temperaturas para evitar que se colapse la madera.

La temperatura se mide con termómetros psicométricos secos dentro de la cámara, esta se expresa en grados centígrados (°C) o en grados Fahrenheit (°F). Entre estos grados existe una relación que se expresa de la siguiente manera:

$$^{\circ}\text{C} = 5/9 (^{\circ}\text{F} - 32)$$

$$^{\circ}\text{F} = 9/5 (^{\circ}\text{C}) + 32$$

2. HUMEDAD DEL AIRE

2.1 CARACTERISTICAS DEL AIRE

El aire es una mezcla de gases que contiene principalmente nitrógeno y oxígeno y pequeñas cantidades de otros gases, entre los que está el vapor de agua.

El aire tiene peso y por tanto ejerce una presión sobre la superficie terrestre.

Si se midiera esta presión se encontraría que es de aproximadamente $1,033 \text{ kg/cm}^2$ sobre la tierra, lo que indica que es una presión equivalente a una columna de mercurio de 76cm, o de una columna de agua de 10,33m.

2.1.1 Presión Parcial. Puesto que el aire es una mezcla de gases, cada uno de ellos contribuye al peso de este y a su vez cada uno ejerce una presión parcial. De muchos experimentos, DALTON concluyó que la presión total ejercida por una mezcla de gases es igual a la sumatoria de las presiones parciales de la mezcla de gases individualmente.

La cantidad de vapor de agua presente en el aire puede variar entre límites muy amplios y consecuentemente la presión parcial, a una temperatura dada, puede variar desde cero en aire seco, hasta la presión de vapor de agua en aire saturado, a esa temperatura.

2.1.2 Presión del Vapor Saturado. El entendimiento del término presión del vapor saturado es necesario para comprender el secado de la madera. La presión de vapor

determina el movimiento de la humedad y por tanto, la velocidad de secado de la madera.

En la atmósfera las moléculas de vapor de agua se juntan y como continúan en movimiento, muchas de ellas retornan a la condición de líquido al entrar nuevamente en contacto con la superficie del agua, este fenómeno se le llama Condensación.

Cuando una molécula está altamente excitada y contiene alta velocidad, al pasar por una superficie de agua a cierta temperatura, su energía cinética le permite vencer la tracción de las moléculas vecinas y escapan del líquido en forma de vapor, a esto se le llama evaporación.

Cuando llega al punto donde el número de moléculas condensadas es igual al número de moléculas evaporadas, se dice que la atmósfera de aire encima del líquido circundante está saturada. En este momento la concentración de estas moléculas ejerce una presión parcial del vapor, conocida como la presión de vapor saturado (P_o) a una temperatura dada. Una disminución en la temperatura del aire provocará la condensación parcial del vapor, resultando una presión de vapor más baja, inversamente un aumento de la temperatura conduce a una mayor evaporación del agua y la presión de vapor aumentará. Concluyendo, para cada temperatura hay un valor específico de la presión de vapor saturado.

La presión de vapor será la misma, independiente de la cantidad de aire presente, siempre que la temperatura permanezca constante.

Por tanto la Presión atmosférica (Pa) puede considerarse como la sumatoria de las presiones parciales del aire seco y del vapor de agua, utilizando la siguiente formula:

$$P_a = P_o + P_{aire}$$

Donde:

P_a = Presión atmosférica

P_o = Presión parcial de vapor saturado

P_{aire} = Presión parcial del aire seco

El contenido de vapor de agua en el aire puede expresarse de varias maneras. Así el termino humedad absoluta (HA) se define como la masa de vapor de agua por unidad de volumen de aire húmedo y generalmente se expresa en gramos por metro cúbico.

La humedad absoluta puede calcularse a partir de la presión de vapor, suponiendo que el aire y el vapor de agua son gases ideales que obedecen a la ley de DALTON y utilizando el volumen molar standard de $0,0224 \text{ m}^3$ (J,F SIAU).

$$HA = \frac{P(18g/mol)(273^0 K)}{(76cmHg)(0,0224m^3/mol)T}$$

Simplificando tenemos:

$$HA = \frac{2,887P}{T}$$

Donde:

HA = Humedad absoluta en g/m^3

P = Presión de vapor en cm de Hg

T = Temperatura del aire en grados Kelvin = °C + 273

En la tabla 2.1 se presentan los valores de presión de vapor y de humedad absoluta correspondientes a diferentes temperaturas.

2.1.4 Tabla Presión del Vapor Saturado

TEMPERATURA		po cm Hg	HAo g/m ³	TEMPERATURA		po cm Hg	HAo g/m ³
°C	°F			°C	°F		
0	32.0	0.458	4.8	54	129.2	11.25	99.3
2	35.6	0.529	5.6	56	132.8	12.38	108.6
4	39.2	0.610	6.4	58	136.4	13.61	118.7
6	42.8	0.701	7.3	60	140.0	14.94	131.0
8	46.4	0.805	8.3	62	143.6	16.38	141.2
10	50.0	0.921	9.4	64	147.2	17.93	153.6
12	53.6	1.052	10.7	66	150.8	19.61	167.0
14	57.2	1.200	12.1	68	154.4	21.42	181.3
16	60.8	1.363	13.6	70	158.0	23.37	198.0
18	64.4	1.548	15.4	72	161.6	25.46	213.1
20	68.0	1.754	17.3	74	165.2	27.72	230.6
22	71.6	1.983	19.4	76	168.8	30.14	249.3
24	75.2	2.238	21.8	78	172.4	32.73	269.2
26	78.8	2.521	24.4	80	176.0	35.51	294.0
28	82.4	2.835	27.2	90	194.0	52.58	424.0
30	86.0	3.182	30.4	100	212.0	76.00	598.0
32	89.6	3.566	33.8	110	230.0	107.46	827.0
34	93.2	3.990	37.5	120	248.0	148.91	1,122.0
36	96.8	4.456	41.6	130	266.0	202.61	1,451.0
38	100.4	4.969	46.1	140	284.0	271.09	1,968.0
40	104.0	5.532	51.1	150	302.0	357.04	2,437.0
42	107.6	6.150	56.4	160	320.0	463.60	3,265.0
44	111.2	6.826	62.2	170	338.0	594.20	3,872.0
46	114.8	7.565	68.5	180	356.0	751.93	4,792.0
48	118.4	8.371	75.3	190	374.0	941.21	5,869.0
50	122.0	9.251	83.2	200	392.0	1,165.65	7,114.0
52	125.6	10.210	90.7				

Tabla 1

2.2 HUMEDAD RELATIVA

La humedad relativa (HR) se define como la relación parcial entre la presión parcial del vapor de agua presente en el aire y la presión de vapor saturado a la misma temperatura, expresado en porcentajes. En otras palabras la HR del aire es la relación entre la cantidad posible de vapor de agua que pueda hallarse en ese volumen de aire a la misma temperatura. Matemáticamente se expresa a través de la siguiente fórmula:

$$HR = \frac{P}{P_0} * 100$$

De acuerdo a esto, la humedad relativa del aire será del 100% si la presión parcial del vapor de agua es igual a la presión del vapor saturado, situación que se presenta cuando el aire está saturado con vapor de agua; y será del 0% si el aire está completamente seco.

También puede calcularse la Humedad Relativa del aire a partir del contenido de humedad (W), utilizando la siguiente fórmula:

$$HR = \frac{W}{W_0} * 100$$

donde:

W = Contenido de humedad del aire

W₀ = Contenido de humedad de saturación

2.2.3 Medición de la Humedad Relativa del Aire. Existen varias formas de medir la humedad relativa del aire, tales como las que vamos a describir:

a) **HIGRÓMETRO:**

Es un aparato que pueda medir HR bajo condiciones naturales y temperaturas inferiores a 80°C. Este aparato se basa en la propiedad de elongarse cuando el aire está húmedo y contraerse si el aire está seco. La elongación o contracción del cabello se transmite mediante un sistema de palancas, a una aguja que indicará en un dial la humedad del aire circundante.

Higrómetro.

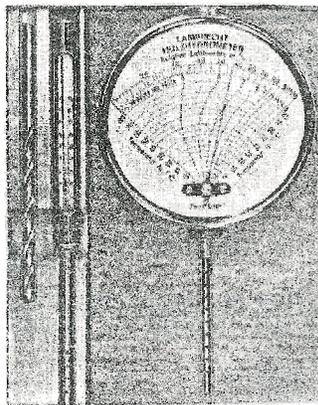


Figura 5

Higrómetro de cabello construido por WILHEM LAMBRECHT, A.G. Gottingen Alemania

b) **PSICOMETRO:**

Sirve esencialmente para determinar HR en una cámara de secado. Este instrumento consta de dos termómetros, en uno de los cuales el bulbo permanece seco e indica la

temperatura real del aire y el otro mantiene su parte sensitiva húmeda, cubierta de algodón altamente absorbente; se le llama bulbo húmedo.

Para un correcto funcionamiento del Psicómetro, es muy importante que se utilice agua destilada o agua lluvia para humedecer la tela, con el fin de evitar incrustaciones en ella que impidan una evaporación normal y consecuentemente se obtenga una lectura del bulbo húmedo próxima a la temperatura del bulbo seco.

Psicómetro.

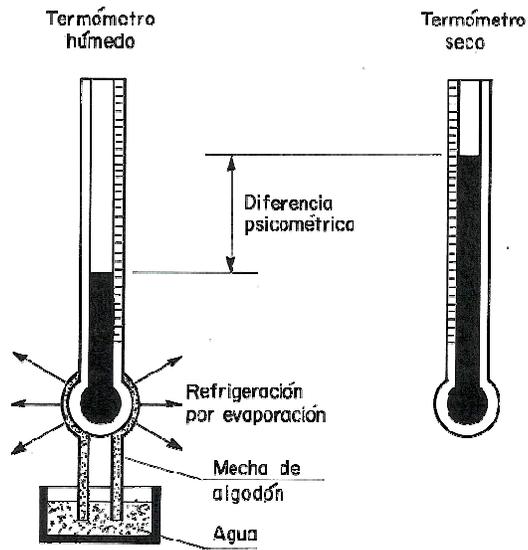


Fig. 2.3 El psicómetro.

Figura 6

c) CARTA PSICOMETRICA O DIAGRAMA DE AIRE HUMEDO

Estas cartas muestran gráficamente todos los valores característicos de la mezcla aire-vapor de agua. La información presentada en estas cartas Psicometricas es variable. Por lo general presentan las relaciones entre las temperaturas de bulbo

húmedo, bulbo seco y punto de rocío, la humedad relativa del aire, el volumen específico de la muestra aire-vapor de agua, el contenido de humedad del aire y el calor total almacenado por la mezcla aire-vapor de agua (entalpía del aire húmedo).

Generalmente estas cartas presentan el contenido de humedad del aire sobre eje vertical y la temperatura de bulbo seco sobre el eje horizontal. Las líneas curvas representan la humedad relativa constante entre 10 y 100% como se ilustra en la Fig. 2.4 y 2.5 (Ver Anexo 6.)

Concluyendo, la carta Psicometrica contiene bastante información respecto al estado de humedad del aire y puede utilizarse para determinar la humedad relativa a partir de los datos sobre la temperatura del bulbo húmedo, seco y punto de rocío.

2.2.4 Control de la Humedad Relativa. La humedad relativa dentro de una cámara de secado puede controlarse de la siguiente manera:

- a) Regulando la temperatura del bulbo seco operando termo estáticamente o mediante mecanismos de enfriamiento.
- b) Controlando termo estáticamente la temperatura del punto de rocío. Esto se lleva a cabo para temperaturas por encima del punto de congelación, mediante el control de la temperatura del agua que por aspersión se inyecta a la corriente de aire seco en movimiento, lo que provocara la evaporación rápida del agua.

- c) Agregando vapor caliente al aire en movimiento para aumentar la humedad relativa, o pasando la corriente de aire por unos serpentines a una temperatura por debajo del punto de rocío para reducirla.
- d) En el caso específico de una cámara de secado de madera, la HR se controla generalmente mediante un sensor y controlador del bulbo húmedo. El vapor caliente se agrega al horno para aumentar la temperatura del bulbo húmedo y las ventilas colocadas en la parte superior del cuarto se abren para permitir el escape del aire húmedo y así disminuir la temperatura del bulbo húmedo.

2.2.5 Relación Entre Humedad Relativa del Aire y la Humedad de la Madera. La humedad relativa del aire afecta directamente la humedad de la madera. Si la humedad relativa del aire aumenta, entonces aumenta la humedad e inversamente, la humedad de la madera disminuye cuando la humedad relativa del aire disminuye. Esta aseveración se cumple cuando se mantiene la temperatura constante y cuando los procesos se llevan a cabo en un sistema cerrado, como es el caso de una cámara para secar madera.

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

De todas estas consideraciones concluimos que la humedad será mas baja cuanto menor sea la humedad relativa del aire y mayor la temperatura. Esto indica que existen las siguientes posibilidades de acelerar el secado de la madera:

- a) Disminuyendo la humedad relativa del aire, dejando constante la temperatura.
- b) Aumentando la temperatura, manteniendo constante la humedad relativa del aire. Esta situación es difícil de manejar.
- c) Combinando la disminución de la humedad relativa del aire con un aumento de la temperatura. Este es el método más común en el secado en cámaras.

2.3 VELOCIDAD DEL AIRE

La circulación del aire es otro de los elementos de control de la velocidad de evaporación del agua durante el proceso de secado de la madera. La ventilación o circulación de aire fresco a través de una pila de madera y la expulsión de la humedad, son condiciones necesarias para asegurar la remoción del exceso de humedad dentro de una secadora y así mantener las condiciones de humedad relativa deseadas.

La velocidad del aire dentro de una pila de madera tiene como función principal, en primer lugar, transmitir la energía requerida para calentar el agua contenida en la madera, facilitando así, su evaporación y, en segundo, transportar la humedad saliente de la madera.

Velocidad del Aire.

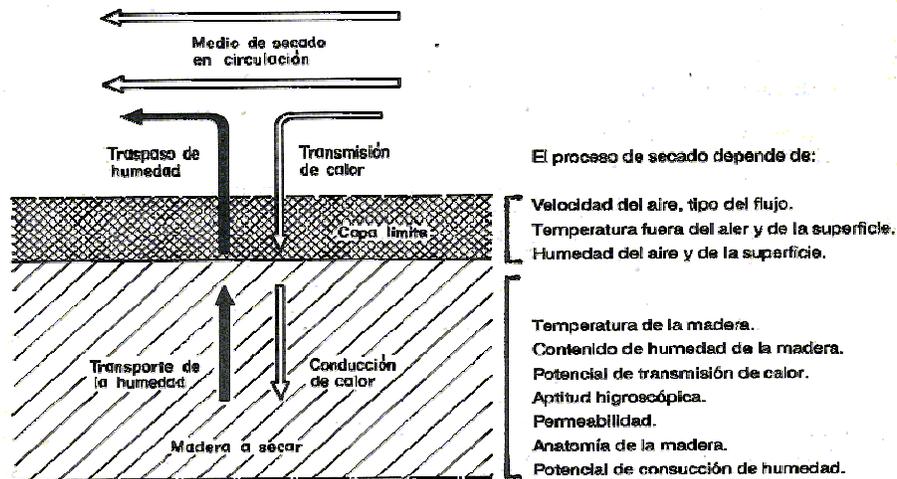


Figura 7

La capa limite que siempre existe entre la madera y el aire juega un papel importante en el secado de la madera. Cuanto menor sea el espesor de esta capa limite, más rápida será la remoción del agua de la superficie de la madera. La forma de la corriente de aire

también es importante para la velocidad del secado. Una corriente turbulenta es mucho mejor que una laminar, pues la turbulenta afecta en mayor forma la capa límite, arrastrando el agua de la superficie y evaporándola en el ambiente.

La velocidad del aire desempeña un papel importante durante las primeras etapas del secado, ya sea este natural o artificial, sobre todo cuando la madera esta muy húmeda ($CH > 30\%$). A mayor velocidad del aire, mayor será la tasa de evaporación y menor el tiempo de secado y viceversa, si la velocidad del aire disminuye, la tasa de evaporación disminuye y se aumenta el tiempo de secado. Por tal razón, para asegurar un secado rápido y uniforme es indispensable una circulación del aire fuerte y regular.

Se ha experimentado que se pueden obtener optimas condiciones de secado a velocidades del aire moderadas. Si se utilizan velocidades muy altas se puede ver comprometida la calidad de la madera, y esto es debido a que la evaporación del agua es mucho más rápida, pero hay que tener en cuenta que a la madera se le debe extraer la humedad de una manera regular para que esta no sufra contracciones y agrietamientos.

Perfil de Velocidad de la Corriente de Aire.

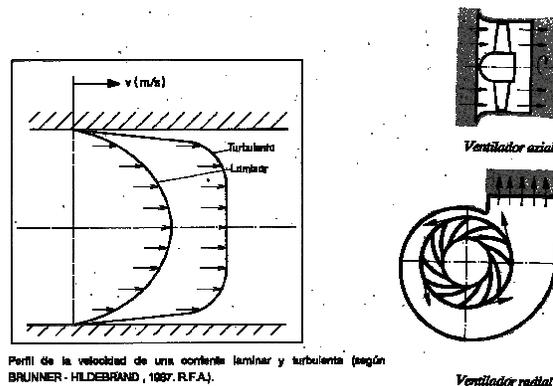


Fig. 2.8 Perfil de la velocidad de una corriente laminar y turbulenta (según BRUNNER - HILDEBRAND, 1957, R.F.A.).

Figura 8

Para ahorrar energía y con esta bajar los costos del secado, se introdujo un sistema de control de la velocidad de circulación del aire dentro de la cámara, con instrumentos computarizados, que se ajustan al contenido de la humedad de la madera a secar y a las tarifas de energía eléctrica. Para variar la velocidad del aire, se puede variar la RPM del motor, y para esto no se requieren motores especiales, se puede trabajar con motores comunes pues se varía el **ciclaje** de la corriente eléctrica y con esto se puede variar fácilmente las revoluciones de los motores y del ventilador. Una reducción de la velocidad de los motores en un 50% significa un ahorro de consumo de energía eléctrica del 75%, sin aumentar el tiempo de secado.

Desde el punto de vista económico hay que tener en cuenta los tres elementos de control del secado de la madera (temperatura, HR y velocidad del aire).

Para modificar las condiciones de HR en un horno a vapor, solo se requiere aumentar o disminuir la cantidad de vapor rociado y/o aumentar o disminuir la acción de las ventilas, por lo cual se puede considerar como el método más económico.

Para el caso de la temperatura, un aumento en la capacidad calorífica, ocasionaría en la caldera un aumento en el hogar de ella y recurrir a una caldera adicional, cuyos costos serian mayores que si se alteraran las condiciones de HR, pero menor cuando se decide modificar la velocidad del aire, ya que la energía eléctrica consumida por los ventiladores es aproximadamente proporcional al cubo de la velocidad de aire.

2.4 CONTENIDO DE HUMEDAD DE EQUILIBRIO DE UN CUERPO

POROSO

Todo cuerpo poroso en contacto con el ambiente absorbe o pierde humedad si no hay una igualdad entre las presiones parciales de vapor del aire circundante y del cuerpo húmedo, mientras que estos valores de la presión de vapor sean diferentes, se puede afirmar que habrá una transferencia depende esencialmente de la humedad del cuerpo al medio circundante o viceversa.

Esta transferencia depende esencialmente de la humedad relativa del aire.

Para un cuerpo saturado de agua, la transferencia será nula si la HR es del 100% y máxima cuando la HR es de 0%; por el contrario, si el cuerpo poroso esta seco, la absorción de humedad del cuerpo será máxima si la HR del aire es del 100% e inexistente si la HR es del 0%.

Cabe anotar que durante el proceso la temperatura del cuerpo poroso tiende alcanzar la temperatura del ambiente, por lo cual se puede concluir que hay una relación directa entre la temperatura, la humedad del ambiente y la humedad de equilibrio del material.

2.4.1 Precisiones de la Humedad de Equilibrio de la Madera. Algunas maderas que contienen significativas cantidades de otras sustancias diferentes del agua y el material leñoso (taninos, sílice, aceites, resinas), pueden apartarse sensiblemente de los valores promedios de humedades relativas en la madera, como es el caso de algunas maderas tropicales donde la desviación de los valores de HR es mas o menos del 3% superiores a las maderas normales.

Humedad de Equilibrio.

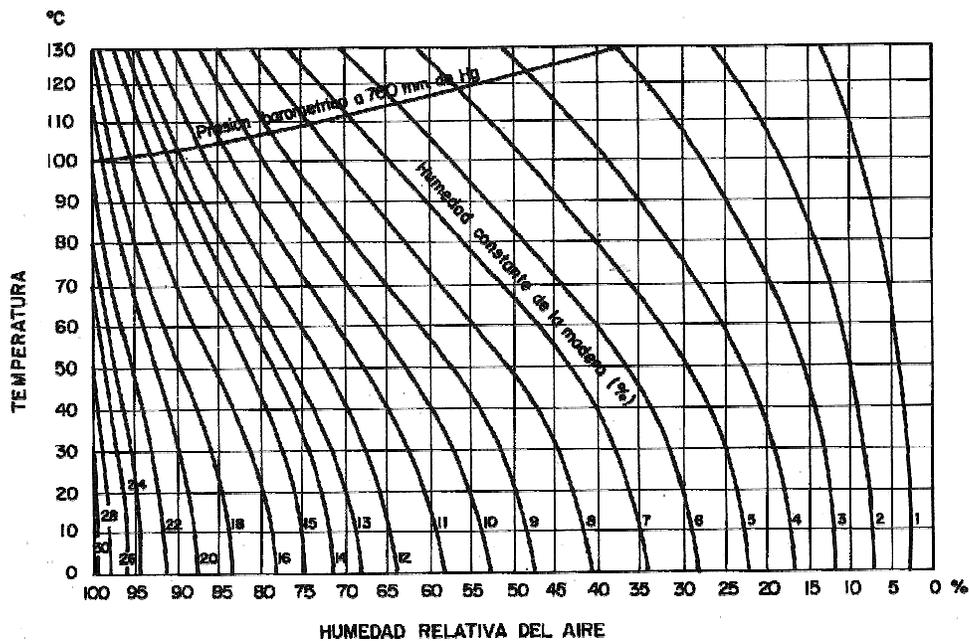


Figura 9

Se ha comprobado también que las diferencias en el valor de la humedad de equilibrio entre las especies son tanto más grandes cuanto más elevada sea la Humedad Relativa del aire. Lo que concluye que las curvas son más ajustadas y confiables cuanto menor sea la humedad del aire.

Hay que tener en cuenta que las maderas que han sido inmunizadas o ignifugadas presentan variaciones significativas en el contenido de humedad de equilibrio, lo que debe tenerse presente cuando se va a someter esta madera al proceso de secado.

2.4.2 Fenómeno de Histéresis. El contenido de humedad de equilibrio depende también si la madera se está secando o si está absorbiendo humedad, porque cuando la madera se está secando (desorción), el contenido de humedad de equilibrio es más alto que cuando la madera absorbe la humedad.

Para la mayoría de las maderas en el punto máxima separación, el contenido de humedad de equilibrio alcanzado durante la absorción es aproximadamente 84% del valor alcanzado durante la desorción o secado, para una misma temperatura y Humedad Relativa del aire. La diferencia de las curvas de equilibrio higroscópico entre desorción y absorción se denomina Histéresis, para mostrar gráficamente ilustramos la siguiente figura:

Curva de Histéresis.

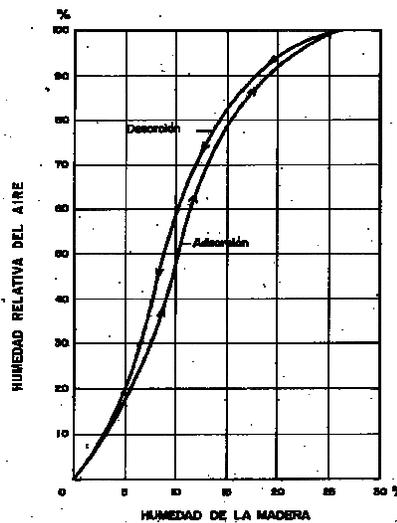


Fig. 2.11 Curva de histéresis para absorción y desorción de humedad de la madera. (E. MÓRATH).

Figura 10

Existen dos teorías que explican el fenómeno de histéresis.

La primera explica la causa para los rangos de humedad comprendidos entre el 0% y el 15% en donde están las zonas desorción química y de absorción. En esta zona predominan cadenas de celulosas, las cuales se saturan mutuamente por la fuerza de atracción entre ellas. Durante el secado, la inercia de las moléculas retarda el proceso y por lo tanto se logra un equilibrio higroscópico mas alto y únicamente con humedades relativamente bajas se acelera.

La segunda teoría explica el rango de humedad comprendido entre el 15% y el punto de saturación de las fibras, o sea, para condiciones de humedad relativa de aire más alta.

Según esta teoría la humectación de las paredes celulares es diferente si hay secado o humificación de la materia. Cuando las paredes celulares están secas, el menisco es más plano, tiene un radio más grande y por lo tanto una Humedad Relativa del aire más alta que cuando las paredes celulares están húmedas. Se deduce que en la absorción la madera llega al equilibrio con humedades relativas del aire más alta.

2.4.3 Importancia de la Humedad de Equilibrio. Es de gran importancia la humedad de equilibrio de la madera para la conducción del secado artificial. En el proceso de secado se puede establecer en cualquier momento la relación entre el contenido de humedad de la madera y su humedad de equilibrio, esta relación se denomina gradiente o pendiente de secado.

En el secado natural solo puede alcanzarse un contenido de humedad de la madera en equilibrio dependiendo de las condiciones climáticas del lugar. Por eso en una región seca y caliente la madera se seca hasta un contenido de humedad menor que en una región fría y húmeda.

De esta manera se obtiene que secando la madera naturalmente, el tiempo requerido para que alcance la humedad de equilibrio es muy largo y por tal razón es aconsejable acudir al secado artificial con la finalidad de reducir el tiempo, aumentar la producción y mejorar la calidad de la madera.

Contenido de Humedad de la Madera.

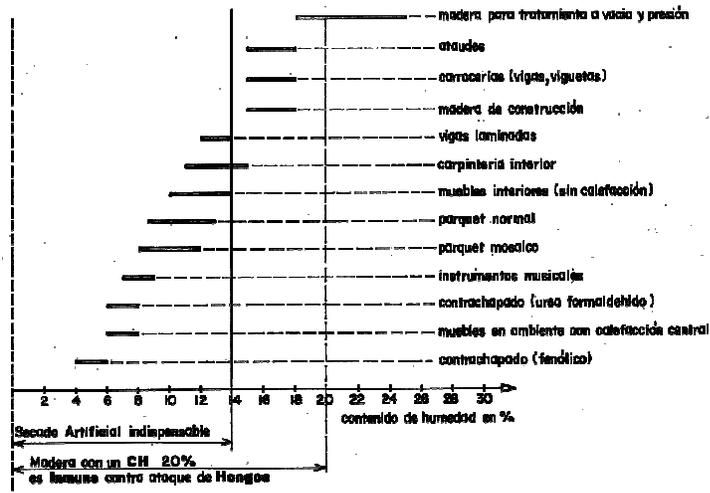


Fig. 2.10 Contenido de humedad de la madera destinada a distintos usos (los valores varían para las diferentes especies; el gráfico indica solamente valores promedio).

Figura 11

2.4.4 Gradiente de Humedad de la Madera y Gradiente de Secado

2.4.4.1 Gradiente de Humedad de la Madera. Solamente en madera recién aserrada se encuentra una distribución mas o menos uniforme del contenido de humedad a través de su sección transversal.

Tan pronto se inicie una fase de secado ya sea natural o artificial, se modifica el contenido interior de humedad. Esto se puede explicar ya que la humedad que se encuentra en el interior sale hasta la superficie de la madera por la alta temperatura y luego se evapora y escapa a la atmósfera. Al colocar la madera húmeda en un ambiente seco la diferencia entre las presiones parciales del vapor de la atmósfera y

del agua contenida en la madera da lugar a la evaporación del agua presente en las capas superficiales y más adelante en las capas internas que aun permanecen húmedas.

La diferencia que se establece entre la humedad en el centro y en la superficie de la madera se denomina gradiente de humedad. Mientras más elevada sea la diferencia del contenido de humedad más rápido seca la madera e inversamente, si el gradiente es muy pequeño el secado será lento, así, se prolongara el tiempo de secado con un aumento en los costos del proceso.

En la figura se muestra la distribución del contenido de humedad en la sección transversal de una pieza de madera.

Distribución del Contenido de la Humedad.

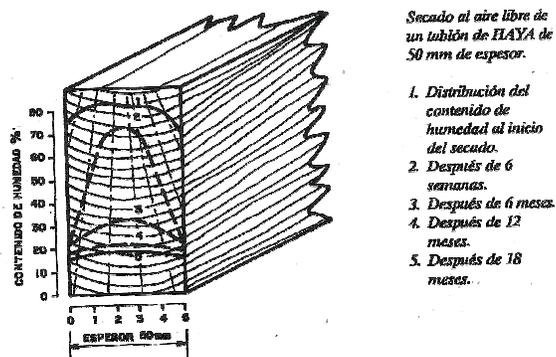


Figura 12

Siempre es bueno establecer un óptimo gradiente de humedad que reduzca el tiempo de secado a un mínimo, cm. correr el riesgo de ocasionar daños en la madera. Si el gradiente es muy fuerte pueden ocurrir daños en las partes externas de la pieza de madera, pues esta alcanza rápidamente un contenido de humedad por debajo del punto

de saturación de las fibras, donde la madera empieza a contraerse, mientras que las capas internas aun tienen cm. libre, generándose tensiones en la madera, las que ocasionan deformaciones importantes. Puede ser que al tener un gradiente muy elevado pueda ocurrir el fenómeno conocido como endurecimiento superficial que interrumpe la circulación del agua por la formación de capas secas impidiendo el secado.

Cuando el contenido de humedad del centro es igual al de la superficie dentro del horno, teóricamente se termina el movimiento de la humedad en la madera y ya no seicara mas por falta de un gradiente de humedad.

Se concluye que la desventaja de secar al aire libre es que no se puede controlar un gradiente de humedad, ya que dependerá directamente de las condiciones climáticas del lugar.

2.4.4.2 Gradiente de Secado. En el proceso de secado artificial existen dos valores del contenido de humedad de la madera que es de gran importancia para establecer el comportamiento del secado. Estos valores son el contenido de humedad real (CH real) de la madera en un determinado momento y el contenido de humedad de equilibrio (ECH) hacia el cual tiende la madera de acuerdo a las condiciones de temperatura y humedad relativa fijadas dentro del secadero. La relación entre estos dos valores se denomina gradiente de secado (GS) y se expresa con la siguiente formula:

$$GS = \frac{CH_{real}}{EC + 1}$$

El gradiente de secado es una medida potencial del secado de la madera. De la magnitud de este gradiente depende la forma y el progreso del secado.

Los gradientes muy elevados producen un secamiento muy rápido de las capas superficiales de la madera, ocasionando tensiones internas, grietas, deformaciones y más aun endurecimiento, y por el contrario un gradiente de secado excesivamente pequeño prolonga el tiempo de secado, aumentando los costos.

El valor del gradiente de secado optimo depende de varios factores como la especie, el espesor, contenido inicial de humedad, tipo de secadero, etc.

2.4.4.3 Desarrollo del Proceso de Secado de la Madera. Las leyes del proceso de secado son de naturaleza diferente, dependiendo de sí el CM. esta por encima o por debajo del P.S.F. Por encima de este punto la velocidad de secado en condiciones estables de temperatura y humedad, permanecen constantes y el movimiento del agua libre liquida es causado por fuerzas capilares. Cuando se evapora el agua libre no se producen tensiones dentro de la madera.

Cuando avanza el secado con contenidos de humedad por debajo del punto de saturación, la permeabilidad de la estructura juega un papel importante en el proceso de remoción del agua. La grafica de la velocidad de secado cambia de una línea recta a una curva exponencial decreciente, presentándose una zona de transición. En este rango el agua retenida en la madera por fuerza de naturaleza molecular y/o eléctricas se mueve por difusión a través de las paredes, debido al gradiente de humedad que se crea entre las paredes de las células vecinas.

Finalmente, la curva tiende hacia a un valor limite que no es otro que la humedad de equilibrio de la madera correspondiente a las condiciones climáticas establecidas.

Curva Teórica de Secado.

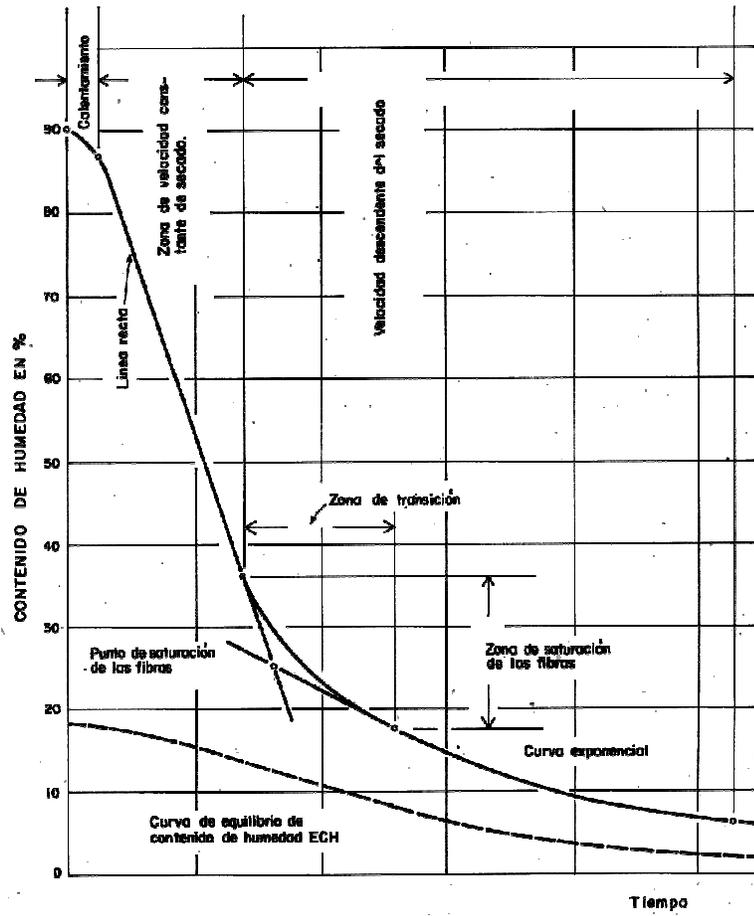


Fig. 2.15 Curva teórica de secado.

Figura 13

3. TECNOLOGÍA DEL SECADO DE LA MADERA

Desde tiempos muy remotos, el hombre ha reconocido las ventajas de secar la madera antes de utilizarla. Hesíodo, hace mas de 2,500 años, recomendaba el apilado y secado al aire de la madera y Plinio utilizo la arena como medio desecador.

Los ebanistas de todos los tiempos apilaban la madera dentro de su taller, encima o cerca de las hornillas de la cola, con el fin de secarla. Obviamente, este era ya un sistema artificial de secamiento, útil solamente para pequeñas cantidades de madera, pero adecuado para las necesidades de los artesanos de esos días.

A medida que la demanda de madera fue aumentando y ante los frecuentes daños e inconvenientes que se tenían con los muebles colocados en los cuartos con calefacción, se incremento la construcción de instalaciones que permitieran obtener madera seca en un tiempo menor. Dichas instalaciones, construidas en ladrillos y argamasa, eran calentadas con los gases procedentes de estufas de leña. El movimiento de aire era producido por diferencias de temperatura y las tablas se apilaban a mano dejando suficientes espacios entre ellas. Poco a poco se fueron agregando ventilas en los techos y paredes para facilitar el intercambio de aire y se mejoraron los sistemas de calefacción. Sin embargo, estos métodos generaban daños apreciables, consistentes en deformaciones y rajaduras.

Al descubrirse que existe una humedad de equilibrio, debida a la correlación entre el contenido de humedad de la madera, por un parte, y la temperatura y humedad del medio ambiente, por otra, se aceptó que el aire caliente impulsado por ventiladores permite acelerar aún más el proceso de secamiento.

De ahí en adelante se ha venido desarrollando la verdadera tecnología del secado de la madera, sobre investigaciones cada día más profundas que han permitido conocer, cada vez mejor, las íntimas relaciones entre el agua y la madera. Asimismo, se han venido desarrollando innovaciones en los equipos y materiales de las cámaras de secado.

Ya en la era actual se cuenta con una tecnología de secamiento bastante avanzada y con equipos y controles totalmente automatizados. Sin embargo, es necesario continuar investigando sistemas que faciliten y hagan más económico el secado de maderas duras tropicales.

Paralelamente al avance de la tecnología convencional, han aparecido otros sistemas artificiales cuya aplicación actual no es, en muchos casos, económica, pero que constituyen alternativas tecnológicas valiosas que ofrecen un horizonte aun más promisorio en el reto de secar más económicamente la madera en el menor tiempo y con los mínimos defectos posibles.

3.1 SECADO NATURAL

El método consiste en exponer la madera a la acción de los factores climáticos de un lugar determinado, lo que permite establecer un equilibrio higroscópico entre el medio y la madera.

El sistema ha sido ampliamente utilizado, pero los cambios climáticos es el factor con mas desventaja ya que no permite el control total del proceso de secado. El tiempo de secado depende del tipo de maderas, de la forma del apilado y de la ubicación del patio de secado.

Hay que tener en cuenta que no es posible por métodos naturales, alcanzar contenidos de humedad menores a los de la humedad de equilibrio del lugar.

3.1.1 La Acción del Aire. Gracias a que el aire transmite el calor a la madera y a la vez arrastra la humedad evaporada de ella, es posible que el clima pueda secar la madera. Este aire cálido se enfría al entrar en contacto con la madera, luego el aire frío es remplazado por otro fresco y cálido y así continua el proceso.

Ligeramente la madera pierde vapor de agua y se forma un gradiente de humedad que por diferencias de presiones de vapor, establece un flujo de agua desde el interior hacia las capas exteriores de ella. Por tanto, siempre habrá vapor de agua disponible para ser cedido al aire circundante, pero el flujo de vapor será lento, porque la velocidad del secado es directamente proporcional al gradiente.

Normalmente en un proceso de secado natural, la madera situada en la parte alta y en las laterales por estar expuesta al aire y a la radiación, seca mas rápido que las partes inferiores de las pilas, donde tiende a llegar el aire frío y húmedo, el secamiento es mas lento.

Variación de CH en el Apilado.

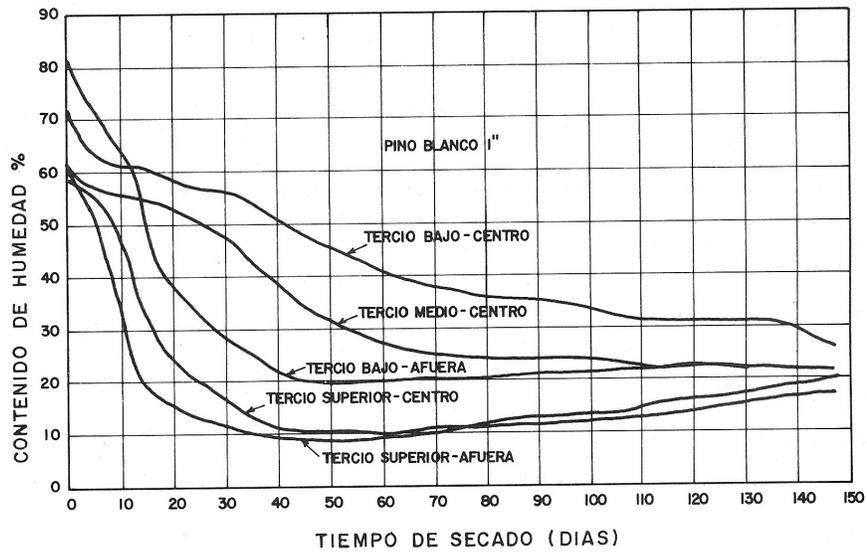


Fig. 3.1 Variación del contenido de humedad en una pila de secado al aire libre. La pila fue confeccionada a mano.

Figura 14

3.1.2 Velocidad de Secado y sus Factores. Esta velocidad con que la madera desprende la humedad, depende de su naturaleza y de los factores ambientales como la temperatura, el viento y la Humedad Relativa. Por tal razón es importante conocer otros factores que se desprenden de los anteriores y garantizan una buena velocidad de secado.

3.1.2.1 El Peso Especifico del Tipo de Madera. El peso especifico es un buen índice de la tasa de secado, porque la madera más liviana seca más rápido que las pesadas. Investigaciones recientes encontraron que la velocidad de secado es aproximadamente inversa a la raíz cuadrada del peso especifico de la madera.

Existen excepciones en que la madera liviana seca mas lento por sus características de permeabilidad, en todo caso en una misma especie la madera de la albura seca mas rápidamente que el duramen, aunque recién cortada la albura contiene mas humedad.

3.1.2.2 Espesor de la Madera. La velocidad de difusión del vapor en la madera es inversamente proporcional al espesor de la pieza de madera y lo podemos expresar así:

$$t_2 = t_1 \left(\frac{s_2}{s_1}\right)^n = t_1 \left(\frac{s_2}{s_1}\right)^2$$

s_1 = Espesor menor

s_2 = Espesor mayor

t_1 = Tiempo de secado en horas para espesor s_1

t_2 = Tiempo de secado en horas para espesor s_2

Teóricamente ($n = 2$) es un resultado esperado, pero en madera delgada n decrece

($n = 1.9, n = 1.7$).

3.1.2.3 Condiciones Climáticas. En las condiciones climáticas la temperatura juega un papel muy importante; el régimen de lluvias afecta la velocidad del secado. En climas áridos, con humedad relativa baja, es imposible evitar los defectos debidos a un rápido secamiento.

En cambio, en zonas de alta Humedad Relativa los defectos de secado no son ocasionados por contracciones ni rajaduras, sino más bien por hongos dada la lentitud del secado natural.

Es importante la orientación del patio de secado, según la dirección de los vientos, ya que el aire es el factor determinante en la velocidad del proceso cuando la temperatura y la humedad son constantes en el medio circundante.

La radiación calienta todo lo que esta alrededor del patio de secado, por esto cuando el aire pasa por hay se calienta y aumenta el potencial de secado.

Es bueno dar tonalidades oscuras al patio de secado ya que los cuerpos negros absorben calor.

3.1.2.4 Método de Apilado. La velocidad del secado también depende de su exposición al medio ambiente.

La madera apilada en forma de X seca más rápido que aquella apilada horizontalmente, e inclusive tiene mayores posibilidades de deformarse.

Cuanto más espaciadas se encuentren las piezas de madera, mayor será la velocidad de secamiento. La altura de las bases para soportar la madera también tiene influencia, porque puede circular mejor el aire dentro de las pilas y por conveccion natural el aire frío tiende a bajar al piso, por tal razón no se pueden depositar desperdicios, ni dejar crecer vegetación baja la estructura de la pila.

3.1.2.5 El Piso de Patio de Secado. El piso del patio de secado debe ser plano y bien drenado, para facilitar el movimiento vehicular y también para potenciar el secado.

Todo depósito de agua o de desperdicio y cualquier clase de vegetación aumenta la Humedad Relativa del aire y retarda el secamiento. Además favorece a la proliferación de plagas y el riesgo de deterioro de la madera se acostumbra a utilizar pisos con alguna inclinación (1 al 2%) para que el agua superficial pueda evacuarse fácilmente.

3.1.2.6 Ventajas y Limitaciones del Secado al Aire Libre. La ventaja principal del secado al aire libre sobre otros métodos de secado es el costo de la inversión inicial en equipos y el patio de secado.

Su principal desventaja es la larga duración del proceso y su imposibilidad de llegar a bajos contenidos de humedad ($CH < 14\%$) como los requeridos en muchos usos. Otra desventaja es la de no poder controlar los cambios climáticos que perjudican a la velocidad de secado y pueden incurrir a formaciones de defectos y daños por agentes biológicos.

Mediante el secado al aire libre se pueden disminuir los costos de un secado artificial, presecándola antes de entrar al humo.

3.2 SECADO ARTIFICIAL

El secado artificial surgió como respuesta a las deficiencias del secado natural. Por medio de aparatos e instalaciones especiales, se establecen en recintos cerrados condiciones climáticas diferentes a las condiciones atmosféricas normales. Mediante

ventiladores, se produce un flujo de aire estable que circula a través de las pilas de madera, con temperatura y humedad relativa controladas de acuerdo a programas preestablecidos según especie y dimensiones de la madera en proceso de secamiento.

La velocidad de secado se puede incrementar, elevando la temperatura tanto como sea admisible para cada especie en particular sin ocasionar daños de consideración. De la misma manera, se puede controlar la humedad relativa del aire de tal forma que los gradientes de humedad no produzcan esfuerzos de tensión causantes de grietas y deformaciones.

El secado artificial, además de reducir considerablemente el tiempo de secado y de restringir la producción de defectos, permite alcanzar contenidos de humedad tan bajos como sean requeridos de acuerdo con el uso final de la madera.

Los costos directos del secado artificial en hornos o cámaras son al principio mucho mas altos que los del secado al aire, ya que a la elevada inversión en instalaciones y equipos hay que agregar los costos de funcionamiento en combustibles, electricidad y supervisión. Sin embargo, la rapidez del secado entre 10 y 40 veces más rápido que al aire libre, la reducción de los inventarios de madera y la calidad final del producto seco, compensan favorablemente las mayores erogaciones del proceso artificial.

El secado artificial se ha venido desarrollando industrialmente en formas diferentes, según el tipo de instalaciones y la manera como se acondiciona el aire que circula a través de las pilas de madera.

3.2.1 Secado Artificial Convencional. El secado artificial se desarrolla en recintos cerrados dentro de los cuales se establecen climas artificiales progresivamente más cálidos y secos. Cada clima o etapa del secado se mantiene durante un determinado lapso, de acuerdo con un programa predeterminado experimentalmente según el tipo y dimensiones de la madera. Como los cambios climáticos inducen contenidos de humedad de equilibrio cada vez más bajos, en las piezas de madera se genera un gradiente de humedad que determina la velocidad de difusión del agua, del interior hacia la periferia.

Los recintos en los cuales se lleva a cabo el secado convencional se conocen como hornos o cámaras de secado, los que además de ventiladores u otros sistemas de inyección de aire o ventilación poseen elementos de calefacción, humidificación, control y registro de las condiciones ambientales, tales como la humedad relativa del aire, la temperatura y el contenido de humedad en diferentes muestras. Estos equipos varían en los diferentes tipos de cámaras e inciden directamente en la eficiencia y calidad del proceso.

El secado convencional es el sistema de secado mas generalizado en el ámbito mundial y se distinguen varias formas, según la intensidad de la temperatura aplicada y las características de las instalaciones.

3.2.2 Secado a Bajas Temperaturas o Presecado. El secado a bajas temperaturas o presecado se realiza con temperaturas inferiores a 45 grados centígrados. La energía proviene del medio ambiente, de los rayos solares o de fuente artificial. Sea cual fuere el origen térmico, el aire cálido es obligado a pasar horizontalmente a través de las pilas

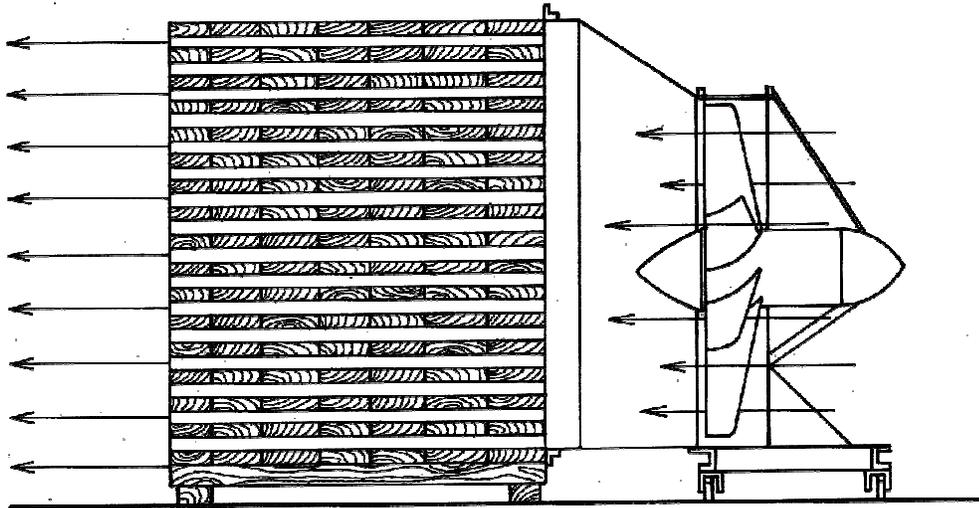
de madera. Cuando únicamente se usa la temperatura ambiente, los ventiladores trabajan solo durante las horas más calurosas o secas del día, mientras que en los días secos y húmedos o durante la noche se apagan para ahorrar energía eléctrica o motriz para evitar que la madera recupere humedad. Con otros tipos de energía calorífica el movimiento del aire debe ser permanente.

El secado a bajas temperaturas casi siempre tiene como finalidad reducir el contenido de humedad de la madera desde el estado verde hasta un 20 a 30%, para evacuar de este modo toda el agua libre y como máximo una tercera parte del agua fija.

Este sistema es ventajoso respecto al secado al aire libre, pues además de llevar la madera a humedades semejantes pero en menor tiempo, permite obtener un producto de mejor calidad ya que las tablas siempre están protegidas contra el sol y la lluvia.

3.2.3 Sistemas Comunes de Presecado. El sistema más elemental de presecado se realiza bajo cubiertas temporales como el secado natural con ayuda de ventiladores. El ventilador se coloca en todo el frente de la madera apilada que estará protegida por un material impermeable. El espacio libre entre el techo y las pilas se cubre con desviadores para evitar turbulencias. El aire lo empujan los ventiladores y con esto se logra una mejor distribución, extrayendo el aire dentro de la cámara. La velocidad del secado depende fundamentalmente de la temperatura y la humedad del aire. La velocidad recomendable del aire es 1m/s aproximadamente.

Sistema de Presecado.



Disposición de un ventilador para el secado al aire libre, acelerado.

Figura 15

Otro secador con aire forzado bajo cubierta similar al anterior es el de cubierta permanente y ventiladores estacionarios. Aquí el factor importante es la temperatura ya que las condiciones climáticas varían periódicamente e incluso en el mismo día, lo que indica que la temperatura ambiente no será suficiente para secar la madera.

Por estas razones hay que elevar y mantener la temperatura en el cuarto, para bajar la humedad de equilibrio y aumentar la velocidad de secado, cosa que no es un proceso económico a menos que el aire sea recirculado dentro de la cámara. Lo anterior obliga a colocar encima del techo del cuarto ventilas o válvulas que permitan la entrada y salida de aire según convenga al clima interior. El cuarto debe tener una temperatura entre 40 y 60°C en todo el proceso de secado y admite entre 100 y 1500 metros cúbicos de madera para secar, la cual puede obtener hasta un 20% de humedad.

La madera de fácil secado permanecerá menos tiempo dentro del cuarto que la de difícil comportamiento y en estos secaderos los defectos que ocurrían en la secada al aire libre se reducen a un mínimo.

3.2.4 Procedimiento de Secado. La estructura del cuarto, los aislantes, las paredes y los equipos deben ser de buena calidad para resistir las condiciones climáticas adversas, propias del trabajo que realizan. El apilado debe permitir la buena circulación del aire y la humedad relativa se controla para mantenerla constante por medio de un control automático de ventilas.

3.2.5 Ventajas del Secado Artificial. La principal ventaja es la aplicación de las condiciones ideales de secado, ya que no va a sufrir cambios bruscos de temperatura del ambiente natural. Se reduce hasta 5 veces el tiempo de secado. Otras ventajas son:

- Se economizan costos en transporte porque se seca mas madera por proceso.
- Se aumenta la productividad de la empresa.
- Se disminuyen los defectos en la madera.

3.2.6 Secado a Temperaturas Normales. El secado convencional o artificial propiamente dicho se realiza a temperaturas que varían entre 45 y 90°C y se lleva a cabo dentro de cuartos llamados cámaras u hornos, en los cuales se puede controlar la temperatura, la humedad relativa y la velocidad del aire.

Para calentar estas cámaras se utilizan diversas fuentes térmicas, siendo las comunes el vapor de agua, el agua caliente y los calentadores o quemadores basándose en

combustibles derivados del petróleo y la energía eléctrica. La madera aserrada en forma de tablas, tablillas o listones, se apila horizontalmente utilizando siempre listones separadores especiales de tamaño adecuado.

El secado se realiza siguiendo un programa previamente establecido, con etapas climáticas progresivamente mas secas y cálidas. El control de las condiciones climáticas se efectúa mediante termómetros de bulbo húmedo y seco (psicómetros) o termómetros y sensores del equilibrio del contenido de humedad que permiten, por una parte, conocer la temperatura y humedad relativa del aire dentro de la cámara y, por otra, mantener mediante controles automáticos las condiciones ambientales deseables.

3.2.7 Instalaciones de Secado. Consiste en un cuarto debidamente aislado del medio natural, dentro de él se puede controlar la temperatura y la humedad relativa del aire que circula a través de la madera. El clima artificial permite el secado de la madera hasta el contenido de humedad final deseada.

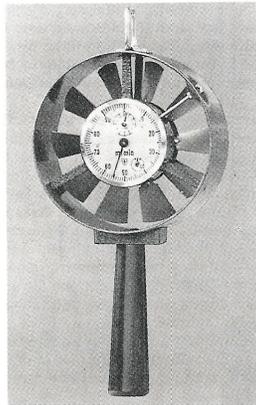
3.2.8 Cámaras de Secado. Son cuartos herméticos equipados con sistema de calefacción que normalmente son radiadores, ventiladores, ventilas, equipo de humidificación y equipos para controlar el clima en el secado.

El techo y las puertas de la cámara deben ser construidos con un material resistente a la acción del clima y el edificio del secadero se debe construir preferiblemente de ladrillos refractarios.

3.3 SISTEMA DE VENTILACIÓN

Los ventiladores se colocan sobre las pilas de madera montados sobre un mismo eje, de esta forma tienen una propulsión axial, aunque es necesario desviar el aire en un ángulo de 90° grados para que pase a través de las pilas de madera. Para esto cada ventilador se coloca dentro de cajones cuya sección longitudinal tiene forma de Z, lo que permite soplar de derecha a izquierda o viceversa según el tipo de motor. La separación sobre cada eje central de los ventiladores puede variar entre 2,4 a 3,0 mts.

Medidor de Velocidad.



Medidores de la velocidad del aire

Figura 16

Las ventajas de los ventiladores axiales son las siguientes:

- Se pueden alcanzar velocidades del aire entre 0,75 y 2,5 m/s.
- Cuando los motores están ubicados exteriormente es posible colocar varias cámaras, una al lado de la otra, sin ninguna interferencia.
- con un solo motor es posible mover grandes volúmenes de aire, impulsados por los ventiladores localizados sobre el eje.

- Al dar un giro de 90 grados el aire presenta irregularidades en el flujo y puntos de circulación nula.
- En cámaras largas los ejes se descentran con facilidad, sobre todo en los tipos Z.
- Esto se da porque generan vibraciones que afectan la estructura.

3.3.1 Ventilación Lateral. En este sistema los ventiladores se instalan entre una pared lateral y la pila de madera. Los ventiladores son axiales, estos se sujetan desde el piso y no exigen un techo falso.

El aire es proyectado horizontalmente y atraviesa la madera en dirección transversal.

Una variación bastante frecuente consiste en utilizar ventiladores de diámetro pequeño situados en el tercio de la pared lateral, de manera que el aire entre o retorne por la porción superior de la pila. Hay que destacar que cuanto mayor es el diámetro de los ventiladores, mayor es la eficiencia en términos de volumen de aire movido por unidades de fuerza.

Ventiladores Axiales.

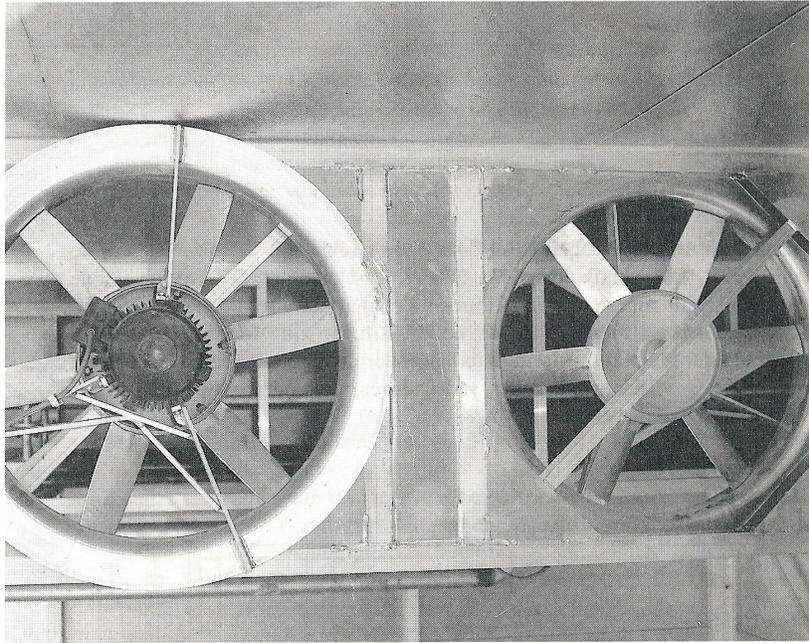


Fig. 3.28 Unidad de ventilación compacta: el ventilador axial de aluminio puro está acoplado directamente al eje del motor.

Figura 17

3.4 SISTEMAS DE CALEFACCIÓN

Son varias las fuentes energéticas utilizadas por el calentamiento del aire en el secado artificial a temperaturas normales y presentaremos las principales características de dichas fuentes de calor.

3.4.1 Vapor a Baja Presión. Según la clasificación americana el vapor a 15 psi o menos se denomina de baja presión. Este sistema es recomendado para secado a bajas temperaturas. Su principal ventaja es la facilidad de obtener humedades relativas altas, su fácil operación y la facilidad de diseño de los intercambiadores de calor. Sin

embargo, solo permite alcanzar aproximadamente 85°C en las mejores condiciones de aislamiento.

3.4.2 Vapor a Mediana y Alta Presión. Es quizás el sistema más apropiado en la industria del secado de madera. Se pueden conseguir temperaturas superiores a los 115°C con 150 psi de presión, pero también se puede trabajar a presiones más bajas según su requerimiento.

Se utilizan líneas o tuberías de vapor y válvulas más pequeñas que las requeridas a bajas temperaturas, obteniendo un calentamiento más rápido de las cámaras con un control menos complicado.

3.4.3 Agua Caliente a Baja Presión. Es similar a los sistemas de baja presión en cuanto a manipulación, niveles de humedad y diseño de los radiadores. Se alcanzan temperaturas cercanas a 120°C con 50 psi de presión. Su instalación es más costosa que las calderas de vapor de baja presión, ya que se requieren tuberías de mayor diámetro, bombas para circulación de agua y una mayor cantidad de superficies de calefacción en los radiadores. En las cámaras solo se alcanzan temperaturas hasta 85°C.

3.4.4 Calentamiento Directo con Desperdicios de Madera. El calentamiento directo con gases de humo provenientes de la combustión de desperdicio de madera o de carbón, no es recomendable en ningún caso, pues este sistema no permite un control eficaz de la temperatura y de la humedad relativa del aire dentro del secadero y aumenta el peligro de daños en el secado. Además, el hollín producido por el desperdicio

ensucia la madera en forma considerable y se depositan partículas de ceniza que tapan la superficie de la madera a secar, demorando el secado por mucho mas tiempo.

3.4.5 Calefacción Eléctrica. Generalmente resulta antieconómica la calefacción eléctrica directa o indirecta, dados los altos costos de instalación eléctrica, armarios y transformadores, así como la energía eléctrica.

3.4.6 Secadero con Intercambiador de Calor Calentado con Desperdicios de Madera. Son comunes e indispensables en la industria maderera y funcionan en forma similar a los sistemas de gas, con la diferencia que la materia prima es más accesible. La inversión inicial es relativamente alta, pero el funcionamiento es muy económico considerando que el combustible resulta barato y esta disponible en toda industria maderera.

3.4.7 Calentamiento a Base de Aceite Térmico. El calentamiento se hace con radiadores similares a los utilizados con vapor y con agua caliente. El aceite se calienta con desperdicios de madera como combustible. Se puede llegar hasta unos 180°C utilizando tubería de baja presión, puesto que este sistema permite temperaturas muy elevadas de hasta 220°C sin una sobre presión dentro del sistema cerrado de calefacción. El flujo del aceite a la cámara se controla en forma similar a la del agua caliente en un circuito cerrado. El vapor necesario para controlar la humedad relativa del aire se genera en intercambiadores calentados con el mismo aceite.

Caldera de Aceite Térmico.

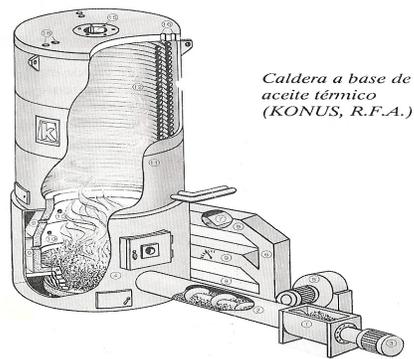


Figura 18

Este sistema es muy útil en el secado a bajas y altas temperaturas. Es ventajoso porque no es contaminante, puede ser controlado automáticamente al igual que los sistemas de vapor y no requieren personal especializado para su manejo.

3.5 CONSTRUCCION DE UNA CAMARA DE SECADO

Las cámaras son espacios cerrados que deben albergar permanentemente la madera durante el secado; deben soportar las condiciones climáticas exteriores y tener suficiente aislamiento para mantener el clima interior.

Los materiales mas utilizados para su construcción son el adobe cocido, los ladrillos de arcilla quemada y en general la mampostería. Últimamente se han venido empleando estructuras metálicas para paredes y techos. La madera también ha sido utilizada, solo que no ofrece garantía de larga duración, aislamiento térmico y resistencia a la humedad y presentamos las principales características de las secciones que componen una cámara de secado.

3.5.1 Los Cimientos. Los cimientos deben soportar la estructura de la cámara, incluidas las paredes y los techos. Las características constructivas deben estar referidas a las condiciones mecánicas del suelo y a las largas de la edificación. El subsuelo debe estar compuesto por piedra, una capa de hormigón de escoria y el recubrimiento de hormigón previamente aislado con un material impermeable para evitar la humedad del piso que afectaría posteriormente el clima del recinto.

3.5.2 El Piso. El piso de una cámara debe ser lo suficientemente resistente para poder soportar el peso de las pilas de madera y el continuo tránsito de las vagonetas. Para un drenaje correcto, todo el piso debe tener un desnivel apropiado y dirigido hacia el canal de drenaje y su superficie debe ser lisa y uniforme. Los sumideros deben estar suficientemente aislados para evitar que se conviertan en puntos de fuga de calor. El piso tiene, en general, las mismas características para los diferentes tipos de construcciones.

3.5.3 Las Paredes. Las paredes generalmente se construyen con diferentes materiales, tales como ladrillos de arcilla, adobe cocido y paneles metálicos de aluminio. Debido al latente peligro de corrosión, no es recomendable la construcción de paneles en acero y todos los elementos de fijación como tornillos, arandelas, pernos y tuercas deben ser de un material resistente a este fenómeno.

Cuando los muros son en ladrillo, generalmente se construyen en doble pared, con un espacio de 5 a 10 cm entre ellas para mejorar las condiciones de aislamiento. La pared exterior puede quedar con el ladrillo a la vista; la interior debe recubrirse con un producto resistente a altas humedades y temperaturas y su acabado debe ser lo más liso

posible para lograr una buena circulación del aire. Es necesario aislar las paredes de los cimientos para evitar grietas por diferencias en las expansiones térmicas de los materiales utilizados.

El mejor resultado lo ofrecen las paredes prefabricadas de elementos estructurales de aluminio puro y con un aislamiento térmico de alta eficacia.

3.5.4 El Techo. Cuando las cámaras se construyen en mampostería, los techos son generalmente en concreto que puede ser aligerado dependiendo del sistema de ventilación utilizado. Cuando los motores de los ventiladores se instalan sobre el techo, este debe diseñarse con capacidad portante y resistente a las vibraciones.

Las esquinas interiores entre el techo y las paredes laterales se pueden redondear para lograr una mejor circulación del aire. La superficie superior del techo debe recubrirse con un material aislante liviano, como escoria, para evitar la condensación del vapor de agua en la superficie interior.

La parte más costosa de una cámara secadora es la losa del techo. Una solución económica es la construcción de las paredes verticales en ladrillos o concreto con un techo prefabricado de aluminio puro.

3.5.5 El Falso Techo. Este se utiliza para separar el espacio destinado a los ventiladores de aquel donde se apila la madera. Sobre el falso techo se colocan los ventiladores, los baffles orientadores del aire y los radiadores o serpentines según el diseño de las cámaras.

La altura del falso techo esta determinada por el diámetro de los ventiladores. A lo largo del falso techo se cuelgan deflectores de 0.3 a 0.5 m de ancho para sellar el espacio entre este y la parte superior de las pilas de madera.

Todas las partes metálicas del falso techo, si no son de un material resistente a la corrosión, tienen que estar permanentemente protegidas contra la humedad.

3.5.6 Los Pasillos Laterales. Los pasillos laterales se extienden a todo lo largo de la cámara, entre las paredes laterales y las pilas de madera. En ellos se colocan los equipos de control, los radiadores o serpentines y los sistemas de humidificación.

Su función principal es la de permitir la circulación del aire. Por lo tanto, se prolongan verticalmente desde el techo hasta un zócalo con esquinas redondeadas y con altura igual a los carros portapilas.

El ancho correcto de los pasillos laterales depende de la altura de la pila y de la velocidad de circulación del aire a través de la pila de madera.

3.5.7 Las Puertas. Las puertas están ubicadas en uno o en los dos extremos del secadero. También puede tratarse de una puerta lateral, dependiendo de las facilidades para la carga de la madera.

Las puertas deben ser fáciles de maniobrar, bien aisladas y resistentes a las condiciones climáticas del secador.

3.5.8 Las Ventilaciones. Las ventilaciones sirven para renovar el aire de las cámaras y controlar la humedad relativa interior. Estas ventilaciones pueden ubicarse sobre el techo o en la parte superior de las paredes. Casi siempre se abren o cierran con un dispositivo automático que recibe ordenes del sistema de control.

Tanto las ventilaciones como las puertas deben construirse con materiales resistentes a la corrosión, preferiblemente de aluminio puro.

3.5.9 Cámaras Metálicas. Los métodos de construcción prefabricada, usando materiales livianos como el aluminio, han permitido la construcción de cámaras modulares de fácil ensamble, que pueden ampliar en cualquier momento su capacidad de producción.

Las principales ventajas de las cámaras metálicas son:

- Se instalan rápidamente sin necesidad de una cimentación costosa.
- Fáciles de trasladar.
- Resisten altas temperaturas.
- Tienen buen aislamiento.
- Se pueden calentar en poco tiempo.

Las cámaras construidas con elementos metálicos prefabricados y resistentes a la corrosión, como el aluminio puro, no requieren un mantenimiento periódico como las cámaras construidas en concreto o mampostería.

3.6 EQUIPAMIENTO DE LAS CAMARAS DE SECADO

3.6.1 Medios de Calentamiento. El calentamiento debe efectuarse en forma indirecta. Para esto se usan varias fuentes de calor tales como gases calientes, aire o vapor, siendo este ultimo el más común. La utilización de la energía eléctrica se usa solo en casos especiales.

El calentamiento del aire dentro de la cámara se hace a través de radiadores que conducen el calor a la cámara. Los radiadores constan de varios tubos con diámetros entre 2 y 7 cm, uno para alimentar el vapor y otro para el drenaje de los condensados, estos radiadores deben tener aletas en forma de laminas o espirales denominados serpentines. Estos serpentines incrementan la superficie de radiación de los tubos lisos de 5 a 8 veces. Con el objeto de mejorar la eficiencia y prolongar su duración, sin necesidad de mantenimiento frecuente, se han diseñado serpentines con la tubería interna en acero y las aletas en aluminio.

Radiadores.

Fig. 3.44 Radiador con tubos en serpentín.

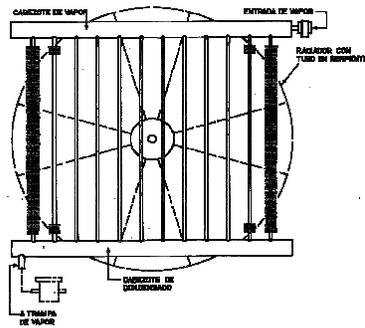


Figura 19

Los serpentines tienen que estar diseñados para calentar uniformemente la cámara. Cuanto mayor sea la diferencia de temperatura con la cámara y mayor sea la circulación del aire, mayor será la transferencia de calor. Como el vapor tiende a condensarse, el agua resultante debe evacuarse del interior a los serpentines, para lo cual se utilizan las trampas del vapor localizadas en la parte inferior de los cabezotes de drenaje. Además se acostumbra colocar los serpentines inclinados con una pendiente del 1 al 2% y el cabezote de alimentación en la parte superior, para ayudar a evacuar los condensados por gravedad.

La capacidad de calefacción instalada dentro de un secadero juega un papel importante en el control del clima durante el proceso de secado. Los principales parámetros que deben tenerse en cuenta para definir la capacidad instalada del sistema de calefacción son:

- Una capacidad de calefacción correctamente dimensionada debe permitir el calentamiento del aire dentro del secadero de 20 a 80°C en aproximadamente 3

horas. Esto es valido para secaderos con una capacidad de hasta 150 m³ de madera aserrada.

- Un sobredimensionamiento de la capacidad de calefacción representa dificultades en el sistema de control del clima, debido a amplitudes grandes e indeseables de la temperatura dentro de la cámara de secado.
- La calefacción debe ser colocada y distribuida en tal forma que permita un calentamiento uniforme y un consumo mínimo de calor durante el proceso de secado.
- Una distribución rápida y uniforme dentro del sistema de calefacción a lo largo de la cámara.
- Requerimientos térmicos.

En una cámara de secado se requiere calor para:

- Calentar el edificio y el equipo.
- Calentar la madera y el agua que ella contiene.
- Calentar el aire hasta las temperaturas programadas.
- Reponer el calor que sale en el aire húmedo durante el proceso de secado, las
- Perdidas por escapes y el calor que tiene la madera seca cuando sale de la cámara.

3.6.2 Dispositivos Para Control de la Temperatura. El control de la temperatura dentro de un secador se efectúa mediante un termostato y se puede tomar como referencia la indicación del termómetro seco del psicómetro. Se controla automáticamente por medio de electroválvulas o válvulas neumáticas, que abren o cierran el paso al medio de calefacción según las necesidades de los programas de secado.

Los termómetros mas utilizados son aquellos de lectura directa, de mercurio o bimetálicos. El bulbo sensor se localiza en la parte media de la cámara en uno de los pasillos laterales. El funcionamiento de estos equipos debe ser verificado periódicamente con un termómetro patrón.

La temperatura se incrementa mediante el accionamiento de los serpentines o radiadores de calor. Este accionamiento debe hacerse automáticamente mediante los termostatos y motovalvulas correspondientes.

3.6.3 Dispositivos Para Control De La Humedad Relativa. La humedad relativa del aire dentro de un secador se puede medir con un psicómetro, verificando la diferencia de lecturas entre los termómetros de bulbo húmedo y seco.

Cuando el control se hace con termómetros de bulbo húmedo y seco, la temperatura del termómetro húmedo debe ser lo mas precisa posible. Esto implica que el recipiente de agua y la mecha de algodón o gasa que lo mantienen húmedo, deben estar libre de incrustaciones que alteren la lectura.

Los termo higrógrafos permiten, registrar gráficamente las condiciones de los diferentes procesos de secado y sirven como base para el control de calidad del mismo.

Actualmente, ya se tienen cámaras con funcionamiento programable y automático, mediante sistemas computarizados que operan a partir de los cambios de humedad que va presentando la madera. Estos cambios de humedad se detectan con sensores conectados a varias muestras de madera o con base en pérdidas de peso de la carga.

La inyección de humedad al interior de las cámaras es necesaria solo en pocas etapas del secado, algunas veces al comienzo del secado y en las etapas intermedias. Al final del secado, cuando se aplica el tratamiento de homogenización de la humedad y equilibrado de tensiones, casi siempre es indispensable inyectar vapor o aspersar agua para incrementar la humedad relativa. La inyección de humedad se hace con lloviznadores, que son tubos con pequeñas perforaciones.

La vaporización o humidificación de la cámara se hace automáticamente y es gobernado por el termómetro de bulbo húmedo o los sensores del clima, siempre a través de un sistema de apertura o cierre de válvulas.

3.6.4 Secado a Altas Temperaturas. El secado a altas temperaturas ha venido imponiéndose en algunos países como Estados Unidos, Chile y Nueva Zelanda, debido a la necesidad de las industrias de incrementar su producción a un costo razonable y muy competitivo.

Desde la primera guerra mundial se seco la madera con vapor sobrecalentado, sin embargo, esta practica no se generalizo debido al rápido deterioro de las instalaciones. Hoy en día se construyen instalaciones apropiadas para cumplir con los requerimientos de altas temperaturas.

En consecuencia todos los esfuerzos se han dirigido a los factores que más inciden en el secado: la temperatura y la humedad relativa del aire que rodea a la madera.

En los primeros estados de secamiento, al evaporarse la humedad se produce un enfriamiento de la madera verde y su temperatura tiende a ser similar a la del bulbo húmedo. Por debajo de la zona de saturación de las fibras, la evaporación disminuye y la temperatura de la madera sube. Al final del secado, dicha temperatura tiende a ser similar a aquella del bulbo seco.

Para llevar acabo este proceso de secado, se precalienta la madera con una temperatura del bulbo húmedo tan cercana como sea posible a los 100°C. Una vez que toda la madera se nivela a tal condición, la temperatura del bulbo seco se incrementa rápidamente. La temperatura máxima aplicada para el bulbo seco depende fundamentalmente del tipo de madera. Sin embargo, se debe tener presente que cuando los motores de los ventiladores se colocan internamente, la temperatura no debe superar los 120°C.

Las principales características a altas temperaturas son:

- **La construcción**

Los materiales son diferentes a aquellos empleados en cámaras convencionales. En los sitios expuestos a mayor corrosión se deben utilizar metales anticorrosivos como el aluminio puro; el acero solo se permite en los lugares menos expuestos y requieren un mantenimiento adecuado a intervalos mas o menos cortos. Las instalaciones deben tener un alto grado de aislamiento.

- **El flujo del aire**

Por regla general, la velocidad del aire es el doble de la requerida en el secado convencional convencional. La razón para esto es la alta velocidad de difusión de la madera.

El aire debe tener una distribución uniforme y pasar equitativamente a través de toda la madera.

- **El calentamiento**

Como la duración de este proceso de secado es apenas la mitad o la tercera parte de aquella en el secado convencional, los requerimientos técnicos son mayores porque se evacua mas cantidad de agua por unidad de tiempo, con una eficiencia térmica total que también es mayor.

- **El apilado**

El apilado de la madera es el mismo que se utiliza en el secado convencional. sin embargo, es de esperarse mayor esmero y mejor uniformidad para el secado a altas temperaturas.

La ventaja de este secado es que es más eficiente que el secado a temperaturas convencionales. Como es poco el aire fresco inyectado, el ahorro de calor es significativo. Las pérdidas de calor, por cualquier escape o falta de aislamiento, no superan en mucho las que se presentan en el secado convencional. También la inversión inicial es bastante alta pero se recupera rápidamente.

3.6.5 Secado con Vapor Sobrecalentado. La madera puede secarse dentro de una cámara convencional utilizando vapor sobrecalentado en lugar de aire para calentarla y extraer la humedad evaporada de su superficie. Para tal efecto, es necesario que el calentamiento y la inyección de vapor sean adecuados y que la cámara esté bien aislada y sea resistente al vapor.

La velocidad de secado depende de la tasa de transferencia de calor a la madera. Por lo tanto, se requiere altas velocidades del aire y capacidad de los ventiladores para mover volúmenes grandes de vapor.

Al iniciarse el proceso, el vapor se inyecta directamente dentro de la cámara hasta que la lectura del bulbo húmedo alcance los 100°C. Entonces el aire existente en el interior es expulsado y el bulbo seco se gradúa para que los radiadores recalienten el vapor circulante hasta la temperatura deseada, que puede ser de hasta 120°C o más. Para evitar que la presión dentro de la cámara supere la presión atmosférica, se requiere que las ventilas puedan abrirse libremente.

A medida que la madera pierde humedad por debajo del PSF, aumenta su temperatura hasta alcanzar aquella correspondiente al bulbo seco, concluyendo entonces el proceso

de secado. La madera llega finalmente a un contenido de humedad de equilibrio correspondiente a la temperatura del vapor recalentado. De esta manera es posible controlar el contenido de humedad y aplicar el periodo de acondicionamiento.

El control del secado no es fácil, ya que el secamiento es rápido y es posible que presente un sobresecado y que haya deformaciones fuera de lo común, también puede suceder que haya una gran amplitud en los gradientes y humedades finales antes del periodo de acondicionamiento.

Aquellas maderas que se someten al proceso desde el estado verde se contraen más de lo normal. Los efectos usuales del proceso son la exudación de resina, aflojamiento de nudos y endurecimiento debido a la acción combinada del vapor y la temperatura.

Este proceso es más eficiente que el secado convencional, porque el aire no interviene en la eliminación del vapor de agua que sale de la madera. Debido a esa mayor eficiencia térmica, el secamiento es mucho más rápido y el material resultante es menos higroscópico y más estable que aquel secado a bajas temperaturas.

3.6.6 Secado por Condensación - Deshumidificadores. El principio de operación en el cual está basado el deshumidificador consiste en una máquina de refrigeración que forma parte esencial de la unidad de secamiento. Esta máquina de refrigeración trabaja como sistema de calentamiento del aire (compresor), como deshumidificador (unidad de secamiento por condensación) y como secador con intercambio parcial de aire (como un secador convencional).

La madera colocada en una cámara hermética y aislada térmicamente, es secada por medio de un flujo continuo de aire seco que circula a través de las pilas con una temperatura que varía progresivamente entre aquella de la cámara y 45°C. El aire seco que pasa uniformemente a través de las pilas, absorbe la humedad que se evapora de la madera. La humedad transportada por el aire es expulsada o succionada por la máquina de refrigeración de la condensación. Luego el agua es evacuada al exterior de la cámara por medio de una tubería de drenaje.

La circulación de aire a través de las pilas es realizada por un sistema de ventilación forzada que forma parte de la unidad de secado y por un grupo de ventiladores externos que permiten una velocidad adecuada o una mezcla permanente del aire que, al absorber la humedad de la madera, la deshidrata.

El ciclo del secado por deshumidificación contempla tres fases distintas, que también pueden operar al mismo tiempo. Estas fases son las siguientes:

- 1) Calentamiento de la madera por medio del aire seco y caliente, que absorbe su calor enfriando el compresor de la máquina de refrigeración.

Esta técnica permite alcanzar temperaturas hasta 50°C sin el uso de resistencias eléctricas u otros sistemas de calefacción, cuya utilización se reduce a un mínimo, a medida que el aire se enfría el compresor transporta el calor al interior de la cámara.

- 2) Secamiento con intercambio parcial de aire entre el interior de la cámara y el ambiente externo.

Cuando la madera esta muy húmeda y la humedad de la cámara es alta, el aire húmedo es expulsado por una ventila especial y reemplazado por el aire del medio ambiente que es mas seco. Esta posibilidad permite una mayor velocidad del proceso de secado y el ahorro de energíá, además, el calor contenido en el aire expulsado es recuperado por la bomba de calor.

3) Secamiento por condensación.

El aire húmedo es condensado en el condensador de la maquina de refrigeración y drenado al exterior de la cámara. Básicamente el deshumidificador consta de las siguientes dos unidades:

- Un aparato acondicionador o maquina de refrigeración que funciona bajo el principio la bomba de calor.
- Una cámara de secado en el cual se colocan las pilas de madera y cuyo ambiente es controlado por la unidad anterior.

3.6.7 Ventajas del Secado por Condensación. Utiliza eficazmente el calor disponible y tiene buenas restricciones en cuanto a los materiales y a la construcción misma de la cámara de secado.

- La inversión inicial y los costos de mantenimiento son comparativamente más bajos, sobre todo para cámaras cuya capacidad este entre 45 y 70 m³.
- Como el sistema funciona a temperaturas relativamente bajas, las velocidades de secado serán también mas bajas que en los sistemas convencionales. Por tal razón, es posible secar al mismo tiempo especies distintas con características de secado similares.

- Es un sistema económicamente eficaz para el secado de pequeñas cantidades de madera aserrada, donde los costos de instalación de una caldera son desproporionalmente elevados en relación con la capacidad total de secado.

3.6.8 Desventajas del Secado por Condensación. La baja temperatura de funcionamiento del sistema conlleva un aumento notable de los tiempos de secado, inmovilizando así el inventario de la madera y reduciendo la capacidad de producción. La diferencia de tiempos de secado para maderas gruesas sería mayor, especialmente para aquellas que pueden secarse rápidamente a temperaturas más elevadas

- El secado por condensación no permite el acondicionamiento final de la madera para la disminución de las tensiones. Para completar bien el proceso de secado sería necesario acondicionar la cámara con un sistema de humidificación, ya sea por medio de un surtidor de vapor provisto de un pequeño generador o por vaporización de agua caliente
- Una característica típica para los secadores de condensación a baja temperatura es la reducción de la capacidad de secado al final del proceso de secado, sobre todo cuando se debe llegar a un contenido de humedad final bajo ($CH_{\text{final}} \leq 12\%$).
- La cámara debe estar bien aislada para evitar las pérdidas de calor en las épocas frías, ya que toda reducción en la temperatura aumenta considerablemente el tiempo de secado. En ciertas instalaciones puede ser necesaria una fuente suplementaria de calor para mantener una temperatura de secado eficaz.
- El secado por condensación no constituye una alternativa válida frente al secado en cámaras convencionales, sobre todo para productores en mediana y gran escala y cuando se trata de especies de secado rápido.

Humedad Relativa vs. Temperatura de Secado

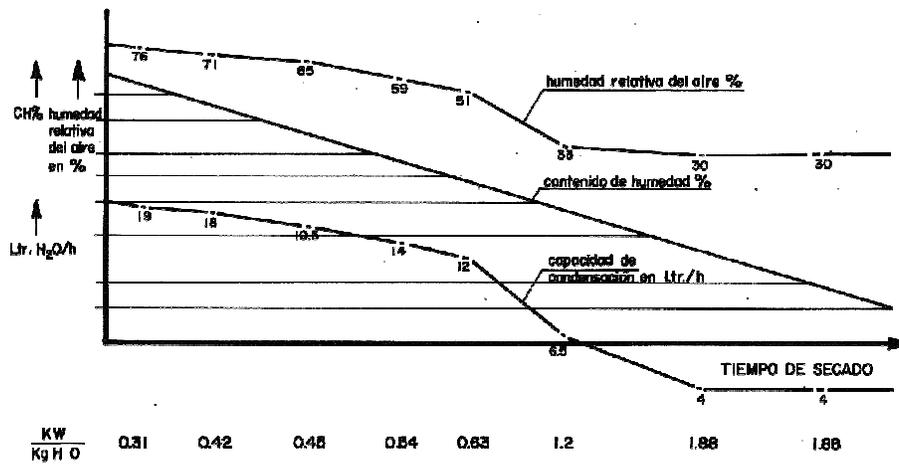


Fig. 3.55 Relaciones entre la humedad relativa del aire dentro del secadero y el rendimiento del equipo de condensación en un rango de temperatura relativamente bajo (según BRUNNER-HILDEBRAND, R.F.A.).

Figura 20

4. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA CAMARA PARA EL SECADO DE MADERA

4.1 DIMENSIONAMIENTO DE LA CAMARA

Inmunizadora Colombia S.A., para la construcción de su cámara desea aprovechar una obra civil que tiene subutilizada, la cual estaba destinada para almacenar leña. Después de una inspección y análisis, se llegó a la conclusión que por su estructura en ladrillo, cumple con las condiciones para construir la recámara, además la empresa tendría una disminución en los costos de construcción.

Las dimensiones del cuarto son las siguientes:

Dimensionamiento del Cuarto

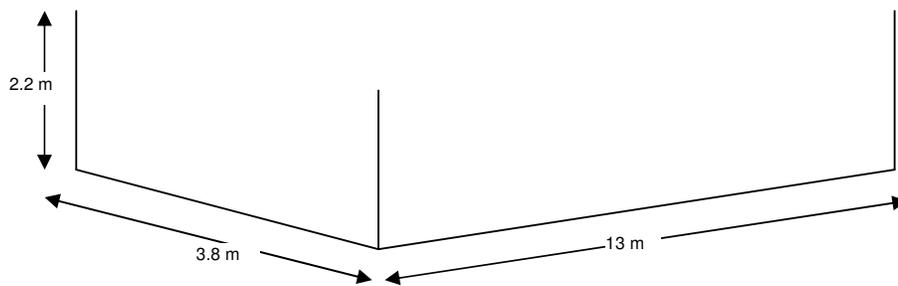


Figura 21

4.1.2 Determinación del Volumen de la Cámara. El ancho de la cámara es de 3.8 mt. Para una buena circulación del aire es optimo una dimensión de 25 cm. a los lados de la cámara según el libro congreso para el secado de la madera, para efectos de inspección y control del secado, se deja una dimensión de 40cm en el pasillo central.

Separación de los Carros.

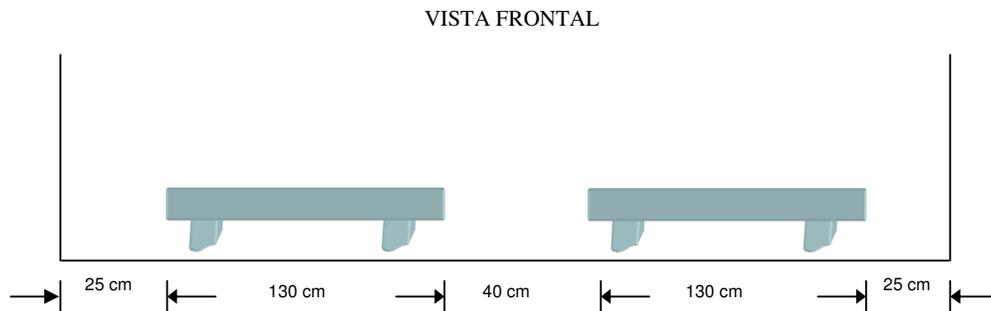


Figura 22

El calculo de la cámara se hará sobre la base de la producción de estacones de 10cm de diámetro por 220 cm. Longitud y el cual de ésta obteniendo una alta demanda, luego en el espacio de 130 cm. Se pueden apilar 13 estacones de 10 cm. De diámetro. La altura de la puerta de la bodega es de 2.2 mt., los separadores utilizados tienen 5 cm. De alto 5 cm. De ancho por 140 cm. De largo, entonces pueden apilarse 13 estacones a lo alto.

13 separadores 5cm = 0,65 mt

13 estacones 10cm = 1,3 mt

altura carro = 0,15 mt

altura de apilación con carro = 2,1 mt.

Numero de estacones por carro 13 x 13 = 169

La longitud de la bodega es de 13 mt, cada estación tiene 2.2 mt de longitud, dejando una separación de 30 cm. Entre carro y carro, caben 5 carros por hilera.

Números de Carros dentro del Cuarto.



Figura 23

$$6 \times 0,3 \text{ mt} = 1.8 \text{ mt}$$

$$5 \times 2.2 \text{ mt} = \frac{11 \text{ mt}}{12.8 \text{ mt}}$$

luego la capacidad total de la cámara es de $169 \times 10 = 1690$ estaciones.

4.1.3 Volumen de Madera a Secar. Volumen de 1 estación = $\frac{\pi D^2 \cdot L}{4}$

$$V = \frac{\pi (0,1)^2}{4} * 2.2 = 0.0173 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen total de madera a secar} = 1690 * 0.0173 \text{ m}^3 = 29.237 \text{ m}^3$$

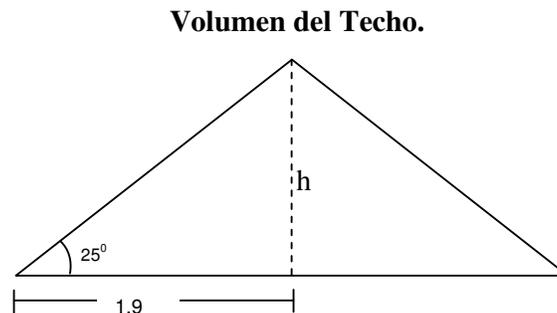
4.1.4 Volumen de la Cámara. Además de los 2.2 mt de altura de la cámara es necesario para soportar el techo 2 hileras de ladrillo y vigas de amarre que representan 60 cm., con lo que se obtendría una altura total de 2.8 mt, entonces el volumen del cuarto sin el techo.

$$\text{Vol. Cuarto sin el techo} = 2.8 \text{ mt} \times 3.8 \times 13 = 138.32 \text{ m}^3$$

4.1.5 Volumen del Techo. La pendiente máxima en techos es de 45°. En el techo de la cámara utilizaremos una pendiente equivalente al 55% de la pendiente máxima. la razón principal de este valor de pendiente es la disposición que tiene la forma del techo para dejar circular el aire, lo que permite que el aire se desplace mejor y llegue a la madera con la velocidad ideal para que arrastre el agua que se encuentra en la superficie de la madera. Además nos dará un mejor espacio y favorecerá el secado de la madera, siendo mas homogéneo y mejorando la penetración del aire a todos los elementos de madera que se encuentran en la cámara de secado.

La pendiente la calculamos de la siguiente forma:

$$\text{Pendiente} = (45^\circ)(0,55) = 25$$



$$\text{tg } 25^\circ = \frac{h}{1,9} \quad h = 1,9 \text{ mt} \times \text{tg } 25 = 0,9 \text{ mt de altura}$$

el área del techo será

$$A = \frac{b * h}{2} \quad A = \frac{(3,8)(0,9)}{2} = 1,71 \text{ m}^2$$

$$\text{Volumen del techo} = A.L = V_t = (1,71 \times 13) = 22,23 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen total de la cámara} = 138,32 \text{ m}^3 + 22,23 \text{ m}^3 = 160,55 \text{ m}^3$$

4.1.6 Calculo del Peso de la Madera. Se va a calcular el peso del volumen total de la madera que entra en la cámara, con el fin de obtener el peso del volumen de agua que se desea evaporar en un tiempo estimado de 4 días, se partirá de un promedio secado de una muestra de 40 piezas a las que se le hizo una medición de humedad, la cual arrojó un promedio de humedad relativa de 100%, esta humedad se desea bajar hasta un 20% de humedad relativa.

La densidad de pino pátula (madera a secar) es de $551,04 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

El volumen total de la madera a secar = $29,237 \text{ m}^3$

Hallamos la cantidad de masa de madera dentro del cuarto

$$\rho = \frac{m}{v} \quad m = \rho \cdot v = 551,04 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 29,237 \text{ m}^3 = 16110,76 \text{ kg}$$

La masa de madera es de 16.11 toneladas.

El piso de la cámara soportara una fuerza de aplastamiento de 16.1 Toneladas, para encontrar el valor de este esfuerzo se utilizara el área del piso para saber como repartir correctamente el peso y así evitar fracturas en el concreto y de paso alargar la existencia del cuarto.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad \text{Donde :} \quad \sigma = 325.9 \text{ N}$$

Lo cual indica que por cada metro cuadrado debe colocarse 325.9 N para homogenizar la carga de madera.

4.1.7 Calculo de la Cantidad de Agua a Evaporar. Para calcular la cantidad de agua a evaporar se utiliza la siguiente formula

$$(P_i - P_f) = \frac{ch * PF}{100}$$

P_i = Peso inicial de la madera (100% H_R)

P_f = Peso final de la madera (20% H_R)

CH = Contenido de HR inicial

$$P_i - 16110,76 \text{ kg} = \frac{100 * 16110,76 \text{ kg}}{100}$$

$$P_i = 32221,51 \text{ kg}$$

$$\text{Cantidad de agua a retirar } P_i - P_f = 32221,51 - 16110,76 = 16110,75 \text{ Kg.}$$

4.1.8 Calculo del Aire Dentro de la Cámara. Volumen de aire dentro de la cámara =

Vol. De cámara – Vol. de la madera

$$V_{\text{aire}} = 160,55 - 29,237 \text{ m}^3$$

$$V_{\text{aire}} = 131,27 \text{ m}^3$$

Calculamos la masa de aire seco que entra a la cámara

$$\rho = \frac{m}{v} \quad \rho_{\text{aire } 20^\circ\text{C}} = 1,214 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$m_{\text{aire } 20^\circ\text{C}} = \rho_{\text{aire } 20^\circ} * V_{\text{aire}}$$

$$m_{\text{aire } 20^\circ\text{C}} = 1,214 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 131,27 \text{ m}^3$$

$$m_{\text{aire a } 20^\circ\text{C}} = 159,4 \text{ Kg. de aire seco}$$

4.1.9 Calculo de la Carga de Calor. $Q_{\text{agua}} = m C_p (T_2 - T_1)$

$$\text{Masa agua} = 16110,75 \text{ kg} \cdot 35518,12 \text{ lbm}$$

$$Q_{\text{agua}} = 35518,12 \text{ lbm} * 0,998 \frac{\text{BTU}}{\text{lbm}^\circ\text{F}} (140 - 68^\circ \text{ F}) = 2552190 \text{ BTU}$$

$$Q_{\text{estacones}} = V\rho C_p (T_2 - T_1)$$

$$Q \text{ estacones} = 1032,5 \text{ Ft}^3 * 31 \frac{\text{lbm}}{\text{ft}^3} \left(0,67 \frac{\text{BTU}}{\text{lbm } ^\circ\text{F}} \right) (140 - 68) ^\circ\text{F} = 1544041,8 \text{ BTU}$$

Q separadores

Se necesitan 3 separadores para cada apilación, luego para cada carro se necesitan 39 para los 10 carros 390 separadores

$$V \text{ separador} = 5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm} \times 140 \text{ cm} = 3500 \text{ cm}^3 \approx 0,124 \text{ ft}^3$$

$$Q \text{ separador} = V \rho C_p (T_2 - T_1)$$

$$Q \text{ separador} = 390 * (0,124 \text{ ft}^3) \left(31 \frac{\text{lbm}}{\text{ft}^3} \right) \left(0,67 \frac{\text{BTU}}{\text{lbm } ^\circ\text{F}} \right) (140 - 68) ^\circ\text{F} = 72319,5 \text{ BTU}.$$

4.2 CARGA DE CALOR POR AIRE

El aire que entra a la cámara a las condiciones del ambiente 20° C y 17% HR según la

tabla psicométrica el contenido de humedad a estas condiciones son: $\frac{3 \text{ gr}}{\text{kg aire seco}}$

(Ver anexo 1)

$$CH_{\text{inicial}} = \frac{3 \text{ gr}}{\text{kg aire seco}} \times 159,4 \text{ Kg. aire seco} = 478,1 \text{ gr. de agua}$$

Cuando el aire se encuentre a una temperatura de 60° C y halla alcanzado una Hr 60% estará en disposición de abandonar la cámara.

$$CH_{\text{final}} = \frac{82 \text{ gr}}{\text{kg aire seco}} \times 159,4 \text{ Kg. aire seco} = 13070,8 \text{ gr. de H}_2\text{O}$$

Cantidad de agua evaporada 13070,8 – 478,1 gr. = 12592,7 gr. H₂O = 12,592 Kg.

H₂O

El numero de veces que hay que remover el aire es igual a la cantidad de agua total a evaporar, entre la cantidad de agua que se evapora por el volumen que hay en la cámara.

$$\text{Numero de renovaciones del aire} = \frac{16110,75 \text{ kg H}_2\text{O}}{12,592 \text{ kg H}_2\text{O}} = 1280 \text{ veces}$$

Dividido entre el numero de horas para el secado programado

$$\# \text{ Renovaciones de Aire} = \frac{1280 \text{ veces}}{96 \text{ horas}} = 13.3 \text{ veces por hora}$$

$$\text{Flujo de Aire} = \frac{13,3}{\text{hr}} * 131.27 \text{ m}^3 = 1746 \frac{\text{m}^3}{\text{hr}} * \frac{1\text{ft}^3}{0,0283\text{m}^3} * \frac{1\text{hr}}{60\text{min}} = 1028 \text{ CFM}$$

$$159,4 \text{ Kg.} \approx 351,4 \text{ lbm.}$$

$$Q \text{ Aire} = m \text{ cp} (T_2 - T_1) * \# \text{ Renovaciones}$$

$$Q \text{ Aire} = 351,4 \text{ lb} * (0,24 \frac{\text{BTU}}{\text{lb}^\circ\text{F}}) (140 - 68^\circ\text{F}) * 1280 = 7772405,8 \text{ BTU.}$$

4.2.1 Carga de Calor de la Madera que Soporta el Techo.

$$V \text{ Alfardas} = 9,5\text{cm} * 5\text{cm} * 220\text{cm} = 10450 \text{ cm}^3 \approx 0,369 \text{ ft}^3 * 56 = 20,664 \text{ ft}^3$$

$$V \text{ Caballete} = 18\text{cm} * 8\text{cm} * 1300\text{cm} = 187200 \text{ cm}^3 \approx 6.61 \text{ ft}^3$$

$$V \text{ Vigas} = \frac{\pi(15)^2}{4} * 380\text{cm} = 67151.7 \text{ cm}^3 * 2 \approx 4.74 \text{ ft}^3$$

$$V \text{ Listones} = \frac{\pi(10)^2}{4} * 90 \approx * 7068 \text{ cm}^3 * 4 = 1\text{ft}^3$$

$$V \text{ Vigas Cielo Falso} = 9 * 8 * 1300 = 93600 \text{ cm}^3 \approx 3.31 \text{ ft}^3$$

$$V \text{ Techo} = 36.32 \text{ ft}^3$$

$$Q = \rho v C_p (\Delta T)$$

$$Q = \frac{31 \text{ lbm}}{\text{ft}^3} * 36.32 \text{ ft}^3 * 0.67 \frac{\text{BTU}}{\text{lbm}^\circ\text{F}} (140 - 68)^\circ \text{F} = 54315,38 \text{ BTU}$$

(Ver Plano Techo.)

4.2.2 Carga de Calor Para Calentar las Paredes. Se supone que las paredes llegan hasta una temperatura promedio entre la temperatura que se maneja dentro de la cámara y la temperatura exterior.

Área de la superficie de concreto y ladrillo

$$280 * 1300 * 2 = 728000 \text{ cm}^2 + \text{triangulo del techo}$$

paredes laterales

$$A = 728000 \text{ cm}^2 + \frac{380 * 90}{2} * 2 = 762200 \text{ cm}^2$$

Área Lateral de un ladrillo = 39 cm. x 20 cm.

Área Total de los ladrillos 800 x (39 x 70) = 624000 cm²

Área del Concreto = 762200 – 624000 = 138200

El espesor del ladrillo es 15 cm. Que es lo necesario para pegar los adobes.

Volumen del concreto = 138200 x 15 = 2073000 cm³ = 73,2 f t³

$$\text{Masa Concreto} = \rho v = 106 \frac{\text{lbm}}{\text{ft}^3} * 73,2 \text{ ft}^3$$

$$Q \text{ Concreto} = 7759,2 \text{ lbm} * 0.2 \frac{\text{BTU}}{\text{lbm}^\circ\text{F}} * (140 - 72)^\circ \text{F} = 105525.12 \text{ BTU}$$

Masa del ladrillo = 12.125 lbm

$$Q \text{ ladrillo} = (800) (12.125 \text{ lb}) (0.2) (140 - 72)^\circ \text{F} = 131920 \text{ BTU}$$

4.2.3 Cálculo del Espesor del Aislante.

Espesor del Aislante

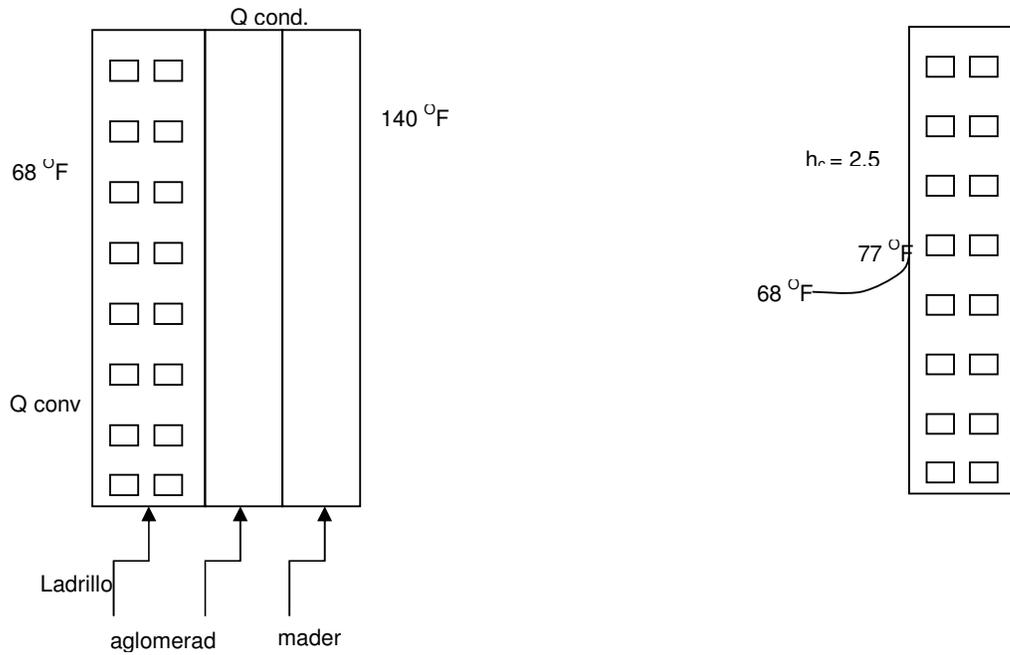


Figura 25

El aislante debe bajar la temperatura de 60° C a 25° C. en la pared del ladrillo

$$Q_{\text{conv}} = Q_{\text{cond}}$$

$$Q_{\text{conv}} = h_c A \Delta T$$

$h_c = 1 - 5$ Aire convección libre

Promediamos 2.5

$$\frac{\text{BTU}}{\text{hrft}^3 \text{ } ^\circ\text{F}}$$

Variación de Calor

$$Q_{\text{conv}} = 2.5 \frac{\text{BTU}}{\text{hr f t}^2 \text{ } ^\circ\text{F}} A (77 - 68)^\circ\text{F}$$

$$q_{\text{conv}} = 22.5 \frac{\text{BTU}}{\text{hr f t}^2 \text{ } ^\circ\text{F}}$$

$$Q_{\text{cond}} = \frac{\Delta T}{\sum R}$$

$$Q_{\text{cond}} = \frac{140 - 77}{\frac{L_1}{K_1 A} + \frac{L_2}{K_2 A} + \frac{L_3}{K_3 A}}$$

$$\frac{Q_{\text{cond}}}{A} = \frac{140 - 77}{\frac{0.492}{0.38} + \frac{L_2}{0.089} + \frac{0.072}{0.14}}$$

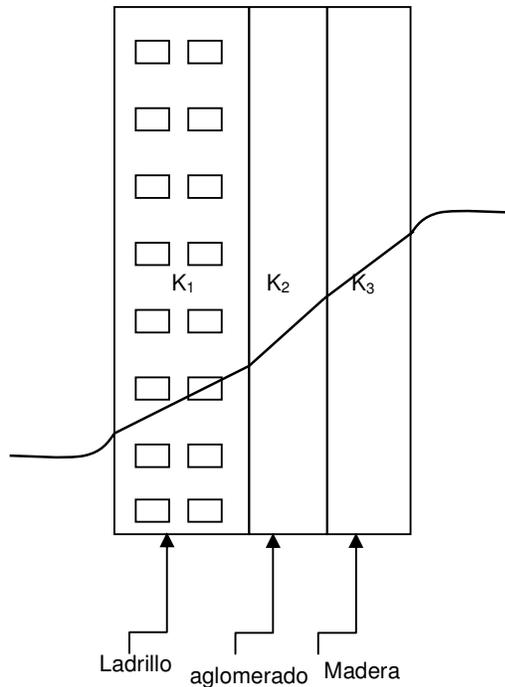


Figura 26

$L_2 = 0,307 \text{ f t} \approx 9,38 \text{ cm}$ este es el espesor del aislante.

PERDIDA DE CALOR POR LAS PAREDES Y TECHO

$$q_{\text{cond}} = 22.5 \frac{\text{BTU}}{\text{hr f t}^2 \text{ } ^\circ\text{F}}$$

$$\text{Área paredes laterales} = 13 \text{ mt} * 2.8 \text{ mt} = 36.4 \text{ m}^2 \approx 391.8 \text{ ft}^2 * 2 = 783.61 \text{ ft}^2$$

$$\text{Area del techo} = 36,81 \text{ ft}^2 + 61569 \text{ ft}^2 = 652.5 \text{ ft}^2$$

$$Q_{\text{cond}} = q_{\text{cond}} * A = 783.61 * 22.5 = 17631.2 \frac{\text{BTU}}{\text{hr}}$$

$$Q_{\text{cond}} = q_{\text{cond}} * A = 652.5 * 22.25 = 14681.2 \frac{\text{BTU}}{\text{hr}}$$

4.3 PERDIDA DE CALOR POR LAS PUERTAS

Puertas.

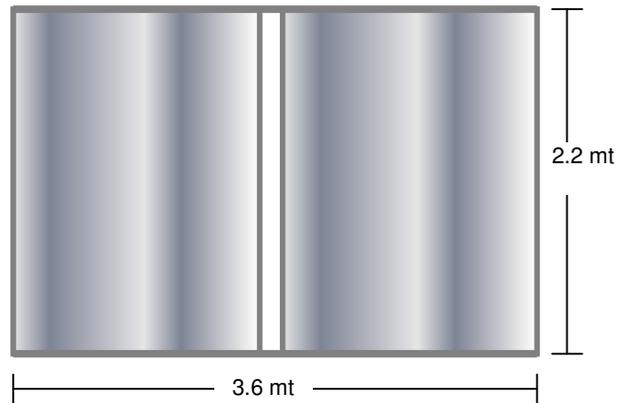
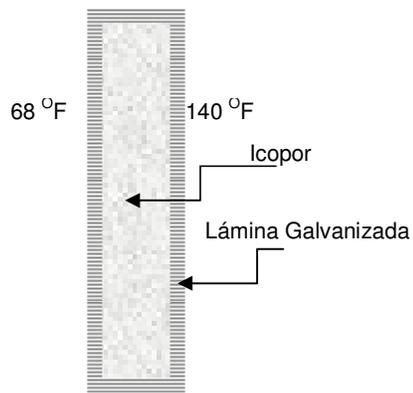


Figura 28

Aislante.



$$Q = \frac{140 - 68}{0.125 \text{ ft}} = 2452 \frac{\text{BTU}}{\text{hr}}$$

$$0.025 \frac{\text{BTU}}{\text{hr} - \text{ft} - ^\circ \text{F}} (11.81 * 7.21) * 2$$

Figura 29

Se desprecia la resistencia de la lamina galvanizada

(Ver Plano)

CARGA TOTAL DE CALOR REQUERIDA

QT = Q agua + Q estacones + Q separadores + Q aire +Q madera de techo +

Q calentar paredes + Q perdidas paredes, puerta, techo.

$$QT = \frac{2552190}{96\text{hr}}\text{BTU} + \frac{1544041.8}{96\text{hr}} + \frac{72319.5}{96\text{hr}}\text{BTU} + \frac{7772405.8}{96\text{hr}}\text{BTU} + \frac{54315.38}{96}\text{BTU} + \frac{105525}{96}12\text{BTU} \\ + \frac{131920}{96}\text{BTU} + 17631.2\frac{\text{BTU}}{\text{hr}} + 14681.2\frac{\text{BTU}}{\text{hr}} + 2452\frac{\text{BTU}}{\text{hr}}$$

$$QT = 162188.54 \frac{\text{BTU}}{\text{hr}}$$

DISEÑO DE LOS INTERCAMBIADORES DE CALOR

Carga de calor a disipar por los intercambiadores

$$QT = 162188.54 \frac{\text{BTU}}{\text{hr}}$$

Temperatura de los fluidos

	ACEITE	AIRE
ENTRA	194 ° F	68 ° F
SALE	149 ° F	140 ° F

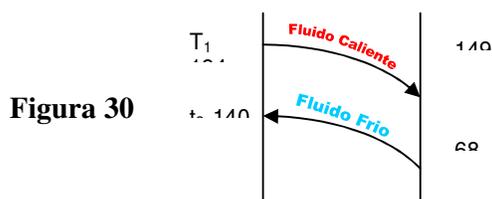
Gasto masico del aceite

$$Q = \dot{m} c_p (T_1 - T_2) \quad 162188.54 = \dot{m} (0.56) (194 - 149)$$

$$\dot{m} = 6436.05 \frac{\text{lb}}{\text{hr}} \quad \text{se asume el flujo cruzado como a contracorriente}$$

$$\text{MLDT} = \frac{(T_1 - t_2) - (T_2 - t_1)}{\text{Ln}\left(\frac{T_1 - t_2}{T_2 - t_1}\right)} = \frac{(194 - 140) - (149 - 68)}{\text{Ln}\left(\frac{194 - 140}{149 - 68}\right)} = 66.59^\circ\text{F}$$

Diagrama de Flujos.



PARAMETROS R y S

$$R = \frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1} = \frac{194 - 149}{140 - 68} = 0.625$$

$$S = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1} = \frac{140 - 68}{194 - 68} = 0.57$$

Ambos fluidos sin mezclarse detenemos $F_T = 0.93$

(Ver Anexo 2.)

$$\Delta t = \text{MLDT} * F_T$$

$$\Delta t = 66.59 * 0.93 = 61.92$$

según las dimensiones del horno y para una correcta distribución de los radiadores y además una fácil construcción dispondremos de una longitud en tubería de 2 mt. Y altura de 0.7 mt.

4.3.1 Área de la Aleta. Utilizaremos una aleta cuadrada de 2.76 in. x 2.76 in. Con bordes despuntados debido a su fácil construcción y tubo liso de $\frac{3}{4}$ "

$$A_f = \left[\text{Área transv aleta} \right] * 2 * \# \text{ aletas} * \text{pulg} * 12$$

$$A_f = \left[2.76 * 2.76 - 2(0.196 * 0.196) - \pi \frac{(7/8)^2}{4} \right] * 2 * 2 * 12 = 333.1 \frac{\text{in}^2}{\text{ft}}$$

Diagrama de Aleta

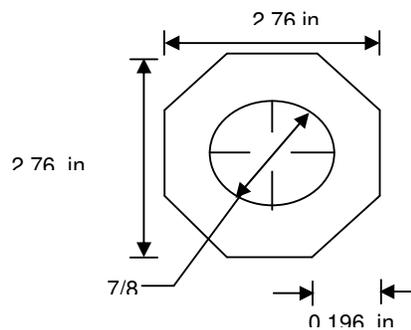


Figura 31

Calibre de la lamina 20 = 0.035 in.

Área Tubo Liso

$$A_o = \pi * 7/8 * 12 - \pi * 7/8 * 2 * 0.035 * 12 = 31.83 \frac{\text{in}^2}{\text{ft}}$$

4.3.2 Perímetro Proyectoado. El perímetro proyectado es la suma de todas las distancias externas en la vista de planta de un tubo aleteado transversal.

Perímetro de Aleta.

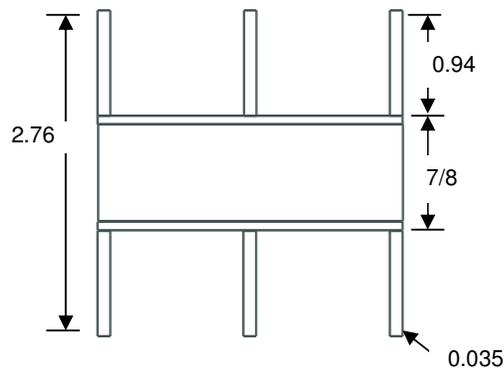


Figura 32

$$\text{PERIMETRO PROYECTADO} = 2 * 0.91 * 2 * 2 * 12 + 2 (12 - 2 * 0.035 * 12) = 112.8$$

$$\frac{\text{in}}{\text{ft}}$$

Diámetro equivalente

$$De = \frac{2(\Delta f + A_o)}{\pi(\text{perímetro proyectado})} = \frac{(333.1 + 31.83)}{\pi * 112.8} = 2.03 \text{ in} \approx 0.171 \text{ ft}$$

Se supone que todo el aire pasa por los serpentines.

Hallamos área de flujo.

a_s = ancho serp * alt sepr – espacio de los tubos – espacio de aletas

$$a_s = 6510.01 * 14 * 7/8 * 236.2 - 14 (2 * 0.035 * 0.943 * 2 * 27.6) = 3565.5 \text{ ir}$$

$$a_s = 24.76 \text{ ft}^2$$

Gasto másico de aire

$$162188.54 \frac{\text{BTU}}{\text{hr}} = \dot{m} (0.24) (140 - 68)$$

$$\dot{m} = 9385.9 \frac{\text{lb}}{\text{hr}}$$

$$G_s = \frac{W}{a_s} = \frac{9385.9}{24.76} = 379.07 \frac{\text{lb}}{\text{hrft}^2}$$

$$\mu_{\text{aire } 104 \text{ oF}} = 1.280 * 10^{-5} \frac{\text{lbm}}{\text{ft} - \text{seg}} * \frac{3600 \text{ seg}}{\text{hr}} = 0.0461 \frac{\text{lb}}{\text{ft} - \text{hr}}$$

$$\text{Res} = \frac{De G_s}{\mu} = \frac{0.171 \text{ ft} * 379.07}{0.0461} = 1406.09$$

Jf = 20.7 (Ver Anexo 3)

$$V = \frac{G_s}{3600\rho} \quad V = \frac{379.07}{3600 * 0.0758}$$

$$V = 1.38 \text{ ft} / \text{s}$$

$$K = 0.015 \frac{\text{BTU}}{\text{hr f}^{\text{t}} \text{ } ^\circ\text{F}}$$

$$\left(\frac{C\mu}{K}\right)^{1/3} = \left(\frac{0.24 * 0.0461}{0.015}\right)^{1/3} = 0.88$$

$\phi_s = 1.0$ para el aire

$$hf = jf \left(\frac{K}{De}\right) \left(\frac{C\mu}{K}\right)^{1/3} = h_f = 20.7 \left(\frac{0.0150}{0.171}\right) \left(\frac{0.24 * 0.0461}{0.0150}\right)^{1/3} = 1.64$$

Factor de obstrucción para el aire

$$R_{do} = 0.002 \quad R_f = \frac{1}{h_f} \quad R_f = \frac{1}{1.64} = 0.614$$

$$h_{do} = \frac{1}{R_{do}} \quad h_{do} = \frac{1}{0.002} \quad h_{do} = 500$$

$$\frac{1}{h_f} = R_f + R_{do} \quad \frac{1}{h_f} = 0.61 + 0.002$$

$$h_f = 1.63$$

Fluido Caliente

$a't$ = área de flujo por tubo

Tubería de $\frac{3}{4}$

$$a't = 0.289 \text{ in}^2$$

$$at = \frac{14 * 0.289}{144} = 0.0281 \text{ ft}^2$$

$$D = \frac{0.606}{12} = 0.051 \text{ ft}$$

$$Gt = \frac{w}{at} = \frac{6436.05}{0.0281} = 229040.9 \frac{\text{lb}}{\text{hr} - \text{ft}^2}$$

$$V = \frac{Gt}{3600\rho} = \frac{229040.9}{3600 * 51.8} = 1.22 \text{ ft} / \text{s}$$

$$Re = \frac{DGt}{\mu} = \frac{0.051 ft * 229040.9}{14.7} = 794.63$$

Calculo de t_{fw}

Asumimos:

$$T_c - t_{fw} = 37.5 \text{ } ^\circ\text{F}$$

$$194 - t_{fw} = 37.5 \text{ } ^\circ\text{F}$$

$$t_{fw} = 156.5 \text{ } ^\circ\text{F}$$

$$\phi_a = \left(\frac{\mu_f}{\mu_{fw}} \right)^{0.14}$$

$$a \quad 171.5 \text{ } ^\circ\text{F} \quad \mu_f = 14.74 \frac{\text{lbm}}{\text{ft} \cdot \text{hr}}$$

$$a \quad 156.5 \quad \mu_{fw} = 17.76 \frac{\text{lbm}}{\text{ft} \cdot \text{hr}}$$

$$\phi_a = \left(\frac{14.74}{17.76} \right)^{0.14} = 0.974$$

$$J_H = \frac{h_i D}{K} \left(\frac{c\mu}{K} \right)^{1/3} * \phi_a \quad (\text{Ver Anexo 5.})$$

$$\frac{l}{D} = \frac{6.56 ft}{0.051} = 128 \quad y \quad Re = 739.3$$

Con $J_H = 3.5$

$$3.5 = \frac{h_i * 0.051}{0.072} \left(\frac{0.56 * 14.74}{0.072} \right)^{-1/3} * 0.974 = 24.88$$

Obstrucción de Flujos

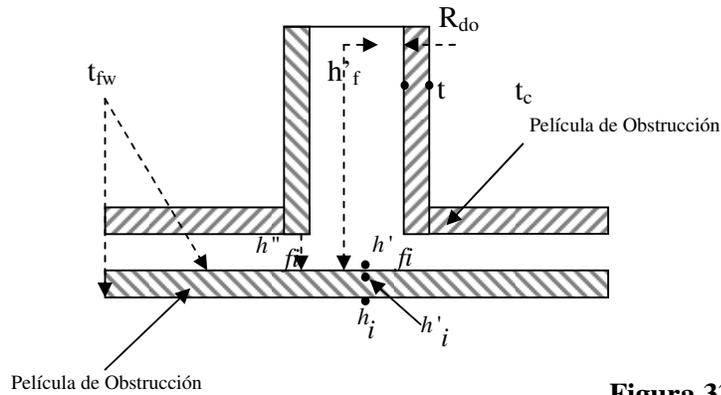


Figura 33

$$h_i = 24.88$$

Para hallar la eficiencia de la aleta necesitamos tener las conductividades del tubo y aleta.

$$k \text{ aluminio} = 117 \frac{\text{BTU}}{\text{h-ft}^2 \text{ } ^\circ\text{F/ pie}} \text{ tomamos el K del aluminio}$$

$$k \text{ cobre} = 224 \frac{\text{BTU}}{\text{h-ft}^2 \text{ } ^\circ\text{F / pie}}$$

$$(r_e - r_b) \sqrt{h'_f / ky_b} = \frac{(1.38 - 0.44)}{12} \sqrt{\frac{1.63}{117 * 0.00146 \text{ ft}}} = 0.24$$

$$y_b = \frac{0.035}{2 * 12} = 0.00146 \text{ ft}$$

$$\frac{r_e}{r_b} = \frac{1.38}{0.44} = 3.13$$

$$\Omega = 0.96 \quad (\text{Ver Anexo 4.})$$

$$h'_{fi} = (\Omega A_f + A_o) \frac{h_f}{A_i}$$

Podemos obtener h'_{fi} para el valor h'_f

$$h'_{fi} = \left(0.96 * \frac{333.1}{144} + \frac{31.83}{144} \right) \frac{1.63}{9.16} = 24.8$$

$$h''_{fi} = h'_f \frac{A_f + A_o}{A_i} = 1.63 \frac{\frac{333.1}{144} + \frac{31.83}{144}}{0.16} = 25.8$$

$$R_{\text{metal}} = \frac{1}{h'_{fi}} - \frac{1}{h''_{fi}} = \frac{1}{24.8} - \frac{1}{25.8} = 0.00156$$

$$R_{di} = 0.001 \quad R_i = \frac{1}{h_i} \quad R_i = \frac{1}{24.88} = 0.040$$

Area de transferencia de calor

$$\frac{1}{h_i} = Ri + R_{di} = 0.001 + 0.04 \Rightarrow h_i = 24.39$$

$$\frac{1}{U_{Di}} = \frac{1}{h_{fi}} + \frac{1}{h_i} = \frac{1}{24.8} + \frac{1}{24.39} \quad U_{Di} = 12.29$$

$$Q = U_{Di} A_i \Delta t$$

$$A_i = \frac{162188.54}{12.29 * 61.92} = 213.13 \text{ ft}^2 \quad \text{Area de transf}$$

Prueba:

la suma de las dos primeras diferencias individuales debe dar la diferencia $t_c - t_{fw}$ y la suma de todas las diferencias debe ser igual a la verdadera diferencia de temperatura.

$$\frac{Q}{A} = \frac{162188.54}{213.13} = 760$$

$$a) \text{ Película anulo } \Delta t_f = \left(\frac{Q}{A_i} \right) / h_{fi} = \frac{760}{25.8} = 29.49^{\circ}$$

$$b) \text{ Obstrucción del ánulo } \Delta t_{do} = \left(\frac{Q}{A_i} \right) R_{do} \frac{A_i}{A_f + A_o} = 760 * 0.002 * \frac{0.16}{\frac{333.1}{144} + \frac{31.83}{144}} = 0.096$$

$$c) \text{ Aleta y tubo metálico } \Delta t_{metal} = \left(\frac{Q}{A_i} \right) R_{metal} = 760 * 0.00156 = 1.186^{\circ}$$

$$d) \text{ Obstrucción del tubo } \Delta t_{di} = \left(\frac{Q}{A_i} \right) R_{di} = 760 * 0.001 = 0.76^{\circ}$$

$$e) \text{ Película tubo } = \Delta t_i = \frac{Q / A_i}{h_i} = \frac{760}{24.88} = 30.54^{\circ}$$

$T_c - t_{fw}$ asumida = $37.5^{\circ F}$

Suma de las dos primeras diferencias

$\Delta t_i + \Delta t_{di} = 30.54 + 0.76 = 31.3$ la diferencia $37.5 - 31.3 = 6.2$ no cambia

materialmente el valor $\left(\frac{\mu}{\mu_{fw}}\right)^{0.14}$

verdadera diferencia Temp. = 61.92

$$\begin{aligned} \text{suma de las diferencias} &= \Delta t_f + \Delta t_{do} + \Delta t_{\text{metal}} + \Delta t_{di} + \Delta t_i \\ &= 29.49 + 0.096 + 1.186 + 0.76 + 30.54 \\ &= 62.072 \end{aligned}$$

Entonces la verdadera área transferencia de calor es 213.13 ft^2

Se disponen de aletas cuya área = 0.0482 ft^2

Área tubo = 1.5 ft^2

Según la configuración y disposición de espacios se ubicaran 3 intercambiadores. Cada intercambiador 14 tubos por disposición de altura.

Área total tubos = $14 \times 3 \times 1.5 \text{ ft}^2 = 63 \text{ ft}^2$

Área total aletas = $213.13 - 63 = 150.13 \text{ ft}^2$

de aletas = $\frac{150.13}{0.0482} = 3114.73$ aletas

4.3.3 Caída de Presión.

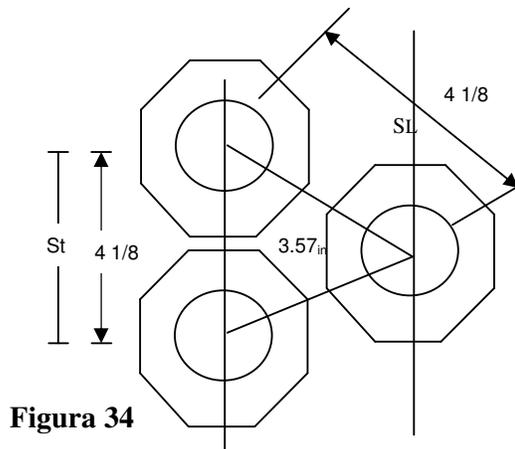
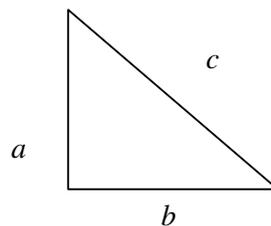


Figura 34



$$a^2 + b^2 = c^2$$

$$b^2 = (4 \frac{1}{8})^2 - (2.06)^2$$

$$b = 3.57$$

Volumen libre neto: es el volumen entre las líneas de centro de dos bancos de tubos verticales menos los volúmenes de la mitad de los tubos y aletas comprendidos dentro de las líneas de centro.

Volumen libre neto =

$$6.56 \text{ ft} * 2.29 \text{ ft} * \frac{3.57}{12} - \frac{1}{2}(7+7) \frac{\pi}{4} * \frac{(7/8)^2 * 6.56}{144} - \frac{1}{2}(7+7) \frac{\pi}{4} * \left(2.75^2 - \left(\frac{7}{8} \right)^2 \right) * \frac{0.035}{144} * 3 * 6.56 = 4.1 \text{ ft}^2$$

$$D'_{ev} = \frac{4 * \text{volumen libre neto}}{A_f + A_0}$$

$$\text{Superficie Friccional} = \frac{1}{2}(7+7) * 0.22 * 6.56 = 10.1 \text{ ft}^2$$

$$D_{ev} = 4 * \frac{4.1 \text{ ft}^2}{10.1 \text{ ft}^2} = 1.62 \text{ ft}$$

$$G_s = 379.07 \frac{\text{lb}}{\text{hr ft}^2}$$

$$Re_s = \frac{1.62 * 379.08}{0.0461} = 13320$$

$$f = 0.0022$$

$$\rho_{104^\circ F \text{ Aire}} = 0.0710 \frac{\text{lbm}}{\text{ft}^3} \quad S = \text{gravedad específica}$$

$$S = \frac{0.0710}{62.5} = 0.001136$$

L_p = es la longitud de la trayectoria

$$\left(\frac{D'_{ev}}{St} \right)^{0.14} = \left(\frac{1.62}{\frac{4.125}{12}} \right)^{0.14} = 1.86$$

4.4 SELECCIÓN DE LOS VENTILADORES

Para condiciones optimas de secado, la velocidad aceptable es de 2 m/s según manual del grupo andino para secado de madera

2 mt/s .6.56 ft/s

$$V = \frac{Gs}{3600s * \rho} \quad 6.56 = \frac{Gs}{3600s * 0.0758 \frac{lb}{ft^2}}$$

$$\left(\frac{SL}{ST}\right)^{0.6} = 1$$

$$\Delta P_s = \frac{f G_s^2}{5.22 * 10^{10} D'_{ev} S \phi_s} \left(\frac{D'_{ev}}{St}\right)^{0.14} \left(\frac{SL}{ST}\right)^{0.6}$$

$$\Delta P_s = \frac{0.0022 * (379.07)^2 * 91.86}{5.22 * 10^{10} * 1.62 * 0.00136 * 1} * 1.86 * 1$$

$$\Delta P_s = 0.00047 \frac{lb}{lh^2} \approx 9.57 * 10^{-4} inH_2O$$

Tuberia

$$Re z = 794.63 \quad f = 0.00062$$

$$(2) \Delta P_t = \frac{f (Gt^2) Ln}{5.22 * 10^{10} * D_s \phi_t}$$

$$\Delta P_t = \frac{0.00062 (229040.9)^2 * 91.86 * 2}{5.22 * 10^{10} * 0.051 * 0.974}$$

$$\Delta P_t = 2.3 \frac{lb}{in^2}$$

$$G_s = 1790.1 \frac{lb}{hr - ft^2} \quad G_s = \frac{w}{a_s} \quad w = 1790.1 * 24.76$$

$$w = 44322.876 \frac{lb}{hr}$$

$$Q = 44322.876(0.24)(140 - 68) = 765899.29 \frac{BTU}{hr}$$

$$Q = CFM (1.08)(T_2 - T_1)$$

$$CFM = \frac{765899.29}{1.08(140 - 68)} = 9849.52 \text{ CFM}$$

$$\text{Por ventilador} = \frac{9849.52}{3} = 3283.176 \text{ CFM}$$

$$Q = V.A \quad \text{Area libre intercambiador} = 2.29 * 6.56 = 15.1 \text{ ft}^2$$

$$3283.176 \frac{ft^3}{M} = V.15.1 \text{ ft}^2$$

$$V = 217.42 \frac{ft}{min} \frac{1mm}{60s}$$

$$V = 3.62 \text{ ft/s} \approx 1.1 \text{ m/s} \quad \text{en el intercambiador}$$

$$\text{Ventilador CFM} = 3283.2 \text{ CFM}$$

$$3288.2 \frac{ft^3}{m} * \frac{1m^3}{35.31 \text{ ft}^3} \frac{1mm}{60s} = 1.55 \frac{m^3}{s}$$

$$\text{Caudal} = 1.55 \text{ m}^3 / \text{s}$$

Seleccionamos un ventilador Siemens (Ver Anexo 6.)

Tipo 2CC2 506 – 5YB6 diámetro 500 mm.

$$\text{Caudal} = 1.91 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \quad \text{Potencia} = 0.19 \text{ Kw}$$

$$\begin{array}{ll} \text{Corriente (A)} & 220\text{v } 1.22 \text{ A} \\ & 440\text{v } 0.61 \text{ A} \end{array}$$

4.4.1 Dimensionamiento de las Ventiladores. Las cfm calculadas para la cámara 1028 cfm

$$1028 \frac{\text{ft}^3}{\text{min}} \frac{1\text{m}^3}{35\text{ft}^3} \frac{1\text{min}}{60\text{s}} = 0.49 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$V = 2 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad Q = V.A$$

$$A = \frac{0.49 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{2\text{m/s}} = 0.245\text{m}^2$$

Se distribuirán 6 ventiladores en el techo; 3 para admitir aire insaturado y 3 para aire saturado.

$$\text{Área por ventila : } \frac{0.245}{3} = 0.0816 \text{ m}^2$$

Radio de la ventila

$$A = \pi r^2$$

$$0.0816 \text{ m}^2 = \pi r^2$$

$$r = 0.16 \text{ m.}$$

4.5 SELECCIÓN DE LA BOMBA PARA LA CIRCULACION DEL ACEITE TERMICO EN LA CAMARA DE SECADO

Para los cálculos de la bomba necesitamos definir algunos lados que servirán para la buena selección del equipo. Los datos a continuación establecen los parámetros del diseño.

D_D = Diámetro de la tubería de descargue 2"

D_S = Diámetro de la tubería de succión = 1 ½"

Q = Caudal en $m^3/h = 20m^3/h$

Partiendo de estos datos comenzaremos el calculo de la selección aplicando la ecuación general de Bernulli:

$$\frac{P_s}{\gamma} + \frac{(V_s)^2}{2g} + Z_1 - H_f + H_T = \frac{P_D}{\gamma} + \frac{(V_D)^2}{2g} + Z_2$$

Donde:

P^s = presión de succión en Pascal

γ = Peso especifico del aceite térmico en IV/m^3

V_s = Velocidad de succión en m/s

Z_1 = Nivel de la bomba con respecto a un eje

H_f = Perdidas por fricción en la tubería

H_T = Cabeza total de la bomba

P_D = presión de la tubería de descarga en pascal

V_D = Velocidad del fluido en la descarga

g = Gravedad en m/s^2

Z_2 = Altura de elevación del fluido matriz

Para efectos de compresión en los cálculos todas las unidades estarán en el sistema internacional.

Ahora podemos calcular las velocidades del fluido en la tubería de succión y en la de la descarga. Sabemos que:

$$Q = VA \Rightarrow V = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{\frac{\pi D^2}{4}}$$

$$V = \frac{4Q}{\pi D^2}$$

Para hallar la velocidad de descarga (V_D) se convierte el diámetro de pulgada a metros:

$$D_D = 2'' = 0.0508 \text{ m} \quad D_S = 1 \frac{1}{2}'' = 0.038$$

$$Q = \frac{20m^3}{h} * \frac{1h}{3600s} = 5.5 * 10^{-3} m^3 / s$$

$$\text{Donde } V_D = \frac{4(5.5 * 10^{-3})}{\pi(0.0509)^2} = 2.714m/s \Rightarrow V_D = 2.714m/s$$

$$\text{Y } V_S = \frac{4(5.5 * 10^{-3})}{\pi(0.038)^2} = 4.85m/s \Rightarrow V_S = 4.85m/s$$

La presión de succión a la cual debe trabajar la bomba para extraer el aceite térmico de la caldera y enviarlo hacia los radiadores es de 3 bar (300000 p_a) y la presión en la descarga es de 5 bar (500000 p_a).

El aceite tiene una gravedad API de 32,1° API. Para llevar esta cantidad al sistema de unidades internacional utilizaremos la siguiente formula:

$${}^0 API = 145 - \frac{145}{\rho_r}$$

donde $\rho_r =$ Es la densidad relativa
del aceite térmico.

$$\Rightarrow \rho_r = \frac{145}{145 - {}^0 API}$$

$$\rho_r = \frac{145}{145 - 32.1} = 1.28$$

$$\gamma_{\text{aceite}} = \rho_r * g * 1000 = (1.28)(9.8)(1000) = 12586.4 \text{ N / m}^3$$

Por otra parte asumiremos $Z_1 = 0$ ya que en ese punto tomamos el eje de referencia donde se va a ubicar la bomba y $Z_2 = 1.6\text{mts}$ que la altura a la cual debe enviar el fluido para que este llegue a los radiadores.

Pretendemos entonces calcular las pérdidas en la tubería para adicionar este valor a la ecuación de Bernoulli y poder hallar el valor de la cabeza de la bomba para su selección.

La ecuación de las pérdidas en tubería recta es:

$$H_{f1-2} = f \frac{LV_D^Z}{D_D 2g} \quad \text{Donde:}$$

H_{f1-2} = Pérdidas en los tramos de tubería recta.

f = Factor de fricción en los tramos de tubería

L = Longitud de tubería recta en todo el sistema

V_D = Velocidad en la tubería de descarga

D_D = diámetro de la tubería de descarga

g = La gravedad

Para calcular el factor de fricción (f) hay que hallar el número de Reynold y el valor de ϵ / D , donde $\epsilon = 0.25 \text{ mm}$ y el $D_b = 50.8\text{mm}$

$$\text{Entonces } \frac{\epsilon}{D} = \frac{0.25 \text{ mm}}{50.8 \text{ mm}} = 4.92 \cdot 10^{-3} = 0.00492$$

$$N_{Re} = \frac{D_D v L}{\mu} = \frac{D v}{r} \quad \begin{array}{l} \text{La longitud de tubería recta} \\ \text{es igual a 24.6 mts} \end{array}$$

Donde:

D_D = diámetro de la de descarga

V = Velocidad de la descarga

L = Longitud de la tubería de la descarga

U = Viscosidad cinemática

r = Viscosidad dinámica

La viscosidad dinámica del aceite térmico que estamos utilizando es de $\gamma = 20 \cdot 10^{-5}$ m²/s.

$$\Rightarrow N_{Re} = \frac{(0.0508)(4.85)}{20 \cdot 10^{-5}} = 1231.9 \text{ Flujo laminar}$$

Ahora con el N_{Re} y el valor ϵ / D hallamos el factor de fricción (f) en el diagrama de MOODY

$$f = 0.032$$

Las pérdidas en tramos de tubería recta serán

$$H_{f1-2} = f \frac{LV_D^2}{2gD_D} = \frac{(0.032)(24.6)(2.74)^2}{2(9.8)(0.058)} = 5.82 \text{ mts}$$

Ahora calculamos las pérdidas por accesorios en las tuberías.

Se van a utilizar 14 codos de 90° y válvulas globo para regular el flujo de aceite. 1
 válvula Check de filtro malla.

* Perdidas por los codos tenemos: $Le =$ longitud equivalente.

$$\frac{Le}{D} = 15.8 * 12 \text{ codos} \Rightarrow Le = 15.8 * 12 * (0.0508)$$

$$Le_{\text{codos}} = 9.63 \text{ mts.}$$

* Perdidas por válvulas globo:

$$\frac{Le}{D} = 131.6 \Rightarrow Le = 131.6 * 1 * 0.0508 = 9.6 \text{ mts}$$

* Perdidas por válvula Check

$$\frac{Le}{D} = 189.2 \Rightarrow Le = 189.2 * 1 * 0.0508 = 9.6 \text{ mts}$$

$$\text{Total perdidas por accesorios} = 28.83$$

$$\text{Total perdidas} = \text{Perdidas por tubería recta} + \text{Perdidas por accesorios.}$$

$$\text{Total perdidas} = 28.8 \text{ mts} + 5.82 = 34.6 \text{ mts.}$$

Con todos estos datos aplicamos la ecuación de Bernulli y hallamos la cabeza total de la
 bomba:

$$\frac{500000 \text{ N/m}^2}{12586.4 \text{ N/m}^3} + Z_1 + \frac{(2.714)^2 \text{ m/s}^2}{2(9.8) \text{ m/s}^2} - 34.6 \text{ mts} + H_T = \frac{300000 \text{ N/m}^2}{12586.4 \text{ N/m}^3} + 1.6 \text{ m} + \frac{(4.85)^2}{2(9.8)}$$

$$H_T = 21.13 \text{ Cabeza total de la bomba}$$

Teniendo la cabeza total y el caudal buscamos en las curvas de los fabricantes de bombas y seleccionamos la bomba que nos represente mejor beneficio para nuestro diseño.

Para iniciar la selección de la bomba se buscó el catalogo que tuviera una bomba con las características que se necesitan para realizar el trabajo dentro de la cámara de secado.

Esta característica esencial fue las RPM, que fueron las recomendadas por los expertos en la materia y que eran necesarias para el trabajo que tiene que realizar la bomba y para que quedara sobre diseñada con el fin de evitar imprevistos en la ejecución del trabajo.

El catalogo de bombas SIHI HALBERG cumple con las condiciones requeridas y seleccionamos la bomba de esta manera:

$$Q = 20 \text{ m}^3/\text{h} \quad \text{y} \quad H_T = 21 \text{ mts} \quad \text{RPM} = 3500$$

$$P = \gamma H_T Q = (5.05 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s})(21 \text{ m})(12586.4 \text{ N/m}^3) = 1453.7 \text{ Watts.}$$

$$P = 1.95 \text{ HP}$$

La potencia recomendada por el catalogo es de 1200 watts, ó 1.6 HP, lo que indica que cumple con el requisito.

La eficiencia por tabla de las curvas característica es:

$\eta = 39\%$ lo que indica que la bomba está sobre diseñada y no trabajará forzada porque su capacidad es de 7 Hp.

NPSH requerido por el fabricante es igual 2.3 mts, lo que indica que la bomba no cubitará ya que el NPSH disponible es mucho mayor.

NPSH disponible >>> NPSH requerido.

4.5.1 Característica de la Bomba Seleccionada.

Caudal : 20 m ³ /h	<ul style="list-style-type: none">• Cierre de Ejes: juntas radiales
Altura max: 45 m	<ul style="list-style-type: none">• Coraza: Tapa Hierro nodular GGGE 40
Velocidad : 3500 RPM	<ul style="list-style-type: none">• Impulsor soporte cubinete: hierro gris CG 23
Temp. Máxima : 320 ⁰	<ul style="list-style-type: none">• EJE: Acero Alse 4340 Norma DIN 4754 y 24255 de construcción.
Presión de trabajo: 10 bar.	

Tabla 2

4.6 CALDERA DE ACEITE TERMICO

En el diseño de la cámara de secado, el calentamiento del aceite que va hacia los radiadores se hace dentro de la caldera, la cual en su hogar se genera la combustión por medio de desperdicios de madera.

Esta caldera cuya fuente de energía es la madera proporciona el calor necesario para calentar el aceite térmico a una temperatura aproximada de 150° F a 220° F, la cual necesita el proceso para calentar el aire dentro de la cámara.

La caldera consta de un hogar en donde se genera la combustión, alrededor del hogar se encuentra una camisa llena de aceite los cuales están conectados con unos serpentines los cuales transportan el aceite a la tubería de baja presión que lleva el fluido a la bomba y de ahí hacia los radiadores.

Este proceso de transporte se regula con una válvula de graduación de caudal para evitar sobre presiones y altas temperaturas. En la selección de la caldera retomamos la carga de calor que necesita el proceso para lograr secar la madera que es de 162188.54 BTU/hr.

Inmunizadora Colombia posee una caldera de aceite térmico que se sobre diseñó para una futura cámara de secado que es la que construimos; esta caldera tiene una capacidad de 400000 BTU/hr y eficiencia del 60% que alimenta un horno para tratamiento de madera fina, cuyo requerimiento calórico es de 200000 BTU/hr. Por consiguiente el excedente nos proporcionará la energía calórica necesaria para nuestra cámara de secado. (Ver planos)

4.7 SISTEMA ELECTRICO

Para una buena circulación dentro de la cámara es necesario invertir el sentido de giro de los ventiladores cada determinado tiempo para que haya una mejor recirculación del aire y la madera a secar no se seque por un solo lado de la pila debido a la circulación del aire en un solo sentido.

Para invertir el sentido del giro diseñamos un circuito de control y un circuito de potencia.

Circuito de control

Este circuito consta de dos pulsadores, uno normalmente abierto (NO) para dar orden de arranque y otro normalmente cerrado (NC) para dar orden de parada.

Al presionar el pulsador de arranque este energiza la bobina de un relay (CR), la cual con una salida de éste mantiene el circuito energizado hasta dar una orden de parada.

También energiza el resto del circuito de control; posee 2 temporizadores (TR1, TR2) ON DELAY que son los encargados de energizar o desenergizar la bobina del relay (CRI) según la secuencia o el tiempo que se programe.

Las salidas NO de CRI energiza otro Relay (CR2) y la NC energiza a (CR3) siguiendo una secuencia para energizar a los conductores R y F que hacen girar el motor en un sentido y luego invertirlo.

Circuito ventiladores 220/440v 1200rpm.

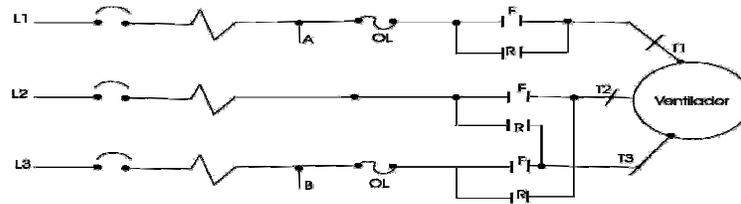
Características

$P = 0.19 \text{ kw}$

$I = 1.22\text{A} - 220\text{v}$

$1.61\text{A} - 440\text{v}$

Circuito de Potencia



Gira Derecha – Izquierda

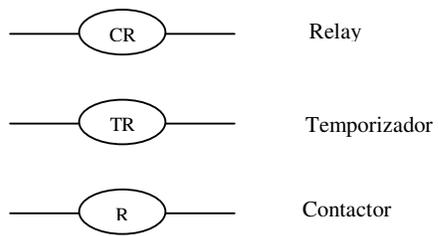


Figura 35

5. MANUAL DE OPERACIÓN DE LA CAMARA DE SECADO

5.1 PROCEDIMIENTO DE OPERACIÓN

Antes de iniciar la operación de la cámara de secado hay que tener en cuenta ciertas consideraciones que serán de vital importancia para el proceso. No obstante hay que verificar los siguientes puntos para lograr un buen desempeño en el trabajo de la cámara.

1. Como primera medida se tomaran referencias de todos los factores de riesgos que puedan ocasionar accidentes . antes de poner en funcionamiento el cuarto, debe inspeccionarse los equipos, las conexiones eléctricas, la limpieza del cuarto, los carros transportadores, los manómetros, las válvulas y la caldera. Todo esto con la finalidad de brindar un buen ambiente de trabajo y recalcar que la seguridad es indispensable para el buen desarrollo de la empresa y la salud de todas las personas que estén en el contorno del sistema.
2. Cuando se pone en operación el cuarto, se debe verificar que todos los equipos estén en perfecto funcionamiento. De acuerdo a esto se debe examinar los manómetros de presión, el caudal de aceite térmico, la temperatura en el cuarto por medio de los termómetros de bulbo seco y húmedo y por ultimo la humedad relativa de aire en el cuarto.

3. El llenado de los carros con madera se debe realizar en tal forma que la posición de los estacones de madera se distribuya homogéneamente, dándole la adecuada separación entre pieza y pieza para que pueda distribuirse mejor el aire forzado dentro de la cámara, con la finalidad de lograr un secado ideal (homogéneo).
4. Se debe verificar la distancia libre que debe existir entre carro y carro (aproximadamente 60 centímetros) y la de la pared de la cámara con los carros (aproximadamente 20 cm). Esto garantizará que el aire se dispersara homogéneamente por toda la pila de madera.
5. Los ventiladores axiales deben encenderse después de puesta en marcha la bomba que succione el aceite térmico de la caldera, para darle tiempo a que el fluido caliente se disperse por toda la tubería y llegue a los radiadores. Esto se debe a que el aire que se hace pasar por los radiadores enfriará el intercambiador y le robará temperatura, la cual necesita para saturar el ambiente y extraerle contenido de humedad a la madera.
6. Las puertas del cuarto serán abiertas únicamente cuando se introduzcan los carros con la madera. Esto con la finalidad de no perder la energía térmica dentro de la cámara, ya que representaría un alza en los costos de secado.
7. Se debe alimentar la caldera 4 o 5 veces aproximadamente cada 24 horas. Esto dependerá directamente del volumen de leña a quemar que se introduzca en la caldera.

8. Se debe cambiar el aire dentro de la cámara aproximadamente 8 veces por hora. Este cambio se llama renovación de aire, el cual se puede intercambiar por medio de unas ventilas ubicadas en el techo del cuarto. Hay que tener en cuenta que si no se renueva el aire la madera absorberá del ambiente el agua nuevamente y se perderá el tiempo de secado, energía eléctrica, combustible y esto representa perdida para la empresa.
9. Se debe verificar el trabajo de la bomba, inspeccionando la presión de trabajo, el caudal y la presión de succión.
10. Se debe inspeccionar la temperatura de los radiadores, de esta depende la temperatura de la cámara y el gradiente de secado.
11. Se debe medir la Humedad Relativa de la madera mínimo cada 6 o 7 horas para tener un control del proceso. Esta humedad se mide con un medidor de humedad digital que se incrusta en algunas piezas y se saca un promedio de humedad relativa.
12. Hay que verificar que la velocidad de secado no sea demasiado alta. Para eso se verifica que sea de máximo 2m/s. Si esta es mayor, la madera puede sufrir rajaduras y torceduras debido a que el contenido de humedad se le extrae muy rápidamente.
13. Como el proceso de secado tiene una duración aproximadamente de 4 días, es de considerar que la madera que se valla a secar inmediatamente después de esta, tenga un presecado al sol. Se debe tener en cuenta que entre menos contenido de humedad

tenga la madera menor será el tiempo de secado y por ende menores costos de producción.

14. La última recomendación para que la maquina funcione perfectamente es que se le haga un mantenimiento general y una limpieza después de cada secado.

Después de haber realizado todos los pasos de operación, la cámara debe presentar un diagnostico o reporte de cómo va la producción de la empresa y agregar si la cámara tiene una eficiencia aceptable. Para esto se necesitan unos registros que los mencionaremos a continuación:

5.1.2 Fichas De Mantenimiento Y Tiempos Muertos. Son formularios diseñados para el secadero donde incluirán los equipos que existen en la cámara, para ejercer un control sobre ellos de tal forma que podamos cuidarlos y mantenerlos con un plan de mantenimiento con su orden de ejecución, las reparaciones y sus causas y finalmente la duración de los periodos de inactividad.

5.1.3 Reporte Sobre Rendimiento Mensual. Durante el transcurso del mes , cada vez que se saca una carga de madera, todos los datos pertinentes a ella deben incorporarse a un reporte mensual de producción que incluye cantidad de madera secada, calidad, especie, tiempo de secado promedio por carga y tiempos perdidos.

El empresario debe diligenciar un registro adicional sobre la cantidad y el costo del combustible utilizado por la caldera de la cámara en el proceso de secado.

Es importante controlar y mantener información diaria del proceso de secado, ya que de esto depende la verdadera organización de la cámara de secado.

5.1.4 Control de Calidad. Para lograr un máximo rendimiento y una mejor calidad en los procesos de secado, tanto al aire libre como en la cámara, toda empresa de madera debe elaborar un programa de control de calidad que contemple los siguientes aspectos:

- El almacenamiento correcto de la madera tanto seca como húmeda.
- Precisión en cuanto a dimensiones de las piezas de madera cortada.
- Realizar un buen apilado.
- Realizar el correcto mantenimiento a los equipos y a la cámara de secado.

Verificar los factores que influyen en el secado como la temperatura, la presión de vapor, humedad relativa de la madera, la humedad de equilibrio, la velocidad del aire dentro de la cámara, el volumen de madera, el gradiente de secado y el tiempo de secado.

6. MANTENIMIENTO DE LA CAMARA DE SECADO

Para garantizar el correcto funcionamiento de la cámara de secado se debe implementar una serie de actividades correspondientes al mantenimiento de los equipos. La finalidad del mantenimiento es controlar la utilidad de los equipos utilizados en la cámara. Esto se logra haciendo una inspección rutinaria de los elementos del proceso de secado y dando un diagnostico completo de estos, así, como de la parte física del cuarto. Para hacer énfasis en esto explicaremos como se deben inspeccionar los equipos y la parte física de la cámara.

6.1 TUBERÍA

- El mantenimiento en la tubería consiste principalmente en eliminar las causas que puedan originar escape del fluido circundante.
- Se deben hacer revisiones periódicas en toda la red de tubería en las uniones y en los codos para observar si hay existencia de picaduras o grietas.
- En ningún caso se puede utilizar pintura o anticorrosivo en la tubería que se encuentra dentro de la cámara de secado, esto perjudicaría al proceso, ya que la superficie de los tubos pertenecen al área de transferencia de calor, es mejor cambiar los tramos malos.

6.2 VÁLVULAS

- Se deben hacer unas inspecciones rutinarias para verificar si hay existencia de fugas que puedan revelar otras condiciones del estado real del secadero.
- Se debe conocer la operación correcta de las válvulas con la finalidad de observar su perfecto funcionamiento.
- Se debe verificar el estado de los empaques de los vástagos, ya que con un tiempo de utilización estos presentan goteos.
- Se deben conservar las válvulas en una envoltura de protección y guardarse bajo techo cuando estas sean desmontadas para hacerle mantenimiento.

6.3 INTERCAMBIADORES

En los radiadores se presenta un fenómeno llamado corrosión Galvanica, debido a la corrosión del material con el cual esta ensamblado. Esto se presenta cuando el mas noble de los materiales entra en contacto con un electrolito, lo que produce un ataque electroquímico. Para este fenómeno hay que hacer lo siguiente:

- Verificar la superficie del material de la tubería.
- Verificar el material de las placas o caletas del radiador.
- Inspeccionar al tacto si la superficie de la tubería de cobre desprende el polvo producto de la corrosión.
- Limpiar la tubería con un aceite especial con la finalidad de evitar el agente corrosivo.
- Realizar estas inspecciones cada 3 meses como mínimo.

6.4 BOMBA

Para realizar el mantenimiento de la bomba de desplazamiento positivo que trabaja en la cámara hay que seguir los siguientes pasos:

- Antes de apagar el equipo hay que verificar las presiones de trabajo de la bomba y el caudal de ella.
- Después se detiene el equipo completamente y se verifica que nadie vaya a operarla para evitar accidentes (desenergizar el equipo).
- Inspeccionar la parte exterior del equipo para ver si hay daños visibles.
- Verificar que no haya tornillos ni anclajes sueltos, apretar si es necesario.
- Revisar el sistema de acople.
- Revisar si hay fugas a través de los sellos de la bomba.
- Si el sello es del tipo de prensaestopas, apretar los tornillos de ajuste. Si hay existencia de fuga remplazarlo.
- Si el sello es mecánico o del tipo de anillo retenedor, debe remplazarse si hay existencia de fuga.
- Verificar los cojinetes de rodamiento que tengan buena lubricación y que presenten daños visibles.

- Conectar la alimentación de electricidad del motor y poner en marcha el equipo para cargar el depósito.
- Observar en marcha el equipo, si el equipo presenta mal funcionamiento o pérdida de potencia, tomar las medidas necesarias.
- Nuevamente revisar los manómetros.
- Realizar un informe sobre las actividades efectuadas. Estas inspecciones deben realizarse cada bimestre.

6.5 VENTILADORES

Para revisar los ventiladores hay que seguir los siguientes pasos:

- Revisar que no existan vibraciones excesivas.
- Comprobar el nivel de lubricación y cerciorarse de que no haya mucho escurrimiento.
- Revisar todas las uniones atornilladas o remachadas, particularmente en las chumaceras, coples, base del motor y cimentación.
- Revisar la tensión adecuada de las bombas de transmisión del calor.
- Observar la condición general de la unidad. Examinar si hay acumulación de suciedad, especialmente en el motor.
- Comprobar que haya señales de corrosión.

Recomendación: Es primordial que el ventilador sea instalado en una buena cimentación que sea rígida y nivelada. Con esto se logra un alineamiento del ventilador y así se evitaría una vibración excesiva.

6.6 INSPECCION DE MOTORES ELÉCTRICOS

Los motores eléctricos deben inspeccionarse mensualmente, y se debe hacer de la siguiente forma:

- Verificar el voltaje de trabajo del motor.
- Verificar el ajuste de los bornes de conexión.
- Verificar si no tienen ruidos anormales.
- Verificar su temperatura.
- Verificar que no tengan vibración excesiva.
- Inspección del estado de acople.
- Análisis de vibración final del conjunto equipo motor.

6.7 PAREDES Y PISOS DE LA CAMARA

- Las paredes de la cámara requieren cuidado especial debido a los choques térmicos que se presentan antes, durante y después de cada proceso de secado, al igual que el contacto directo de la temperatura que desprende el aceite térmico que va por la tubería, y el contacto con los elementos que se introducen en la cámara.

- Se debe revisar cuidadosamente las tablillas de madera y el aislante que se encuentra entre la pared de ladrillos y las tablillas, con el propósito de encontrar anomalías que puedan perjudicar el secado.
- Se deben verificar las puertas y las ventilas, para evitar que este entrando aire del exterior que cambie las condiciones de secado.
- Se debe limpiar continuamente el piso del horno, esta evitara que queden residuos de madera que aumente la carga calórica del cuarto.
- Se debe inspeccionar las condiciones del techo para que no entre o salga aire.
- Se deben realizar estas inspecciones quincenalmente.

6.8 VENTILAS

- Revisar su buen funcionamiento en forma periódica.
- Observar su estado superficial para ver si hay corrosión o no.
- Se debe inspeccionar el sistema de cierre y apertura por donde entra el aire de renovación (por lo menos cada 6 meses).
- Se le debe hacer una limpieza mínimo cada año.

6.9 CALDERA

- Se deben verificar los caudales a los cuales se esta succionando el aceite de la caldera.
- Se le debe realizar una limpieza por lo menos cada año.

- Se debe dotar de aceite cada 4 o 5 procesos de secado.
- Se debe mantener limpio el exterior, ósea, no dejar residuos de madera cerca del hogar para evitar ignición.
- Se debe verificar la temperatura a la cual se bombea el aceite.
- Se debe verificar la presión de trabajo.
- Se debe verificar rutinariamente los parámetros del proceso (caudal, temperatura y presión).

6.10 CHIMENEA

- Realizar una limpieza cada año.
- Revisar periódicamente su superficie para observar si esta se corroe.
- Revisar los tensores que la suspenden (si es el caso apretarlos).

Todas estas operaciones de mantenimiento deben realizarse para lograr un buen proceso de secado y obtener una buena eficiencia de la cámara para garantizar un trabajo de buena calidad que beneficiaran a la empresa con una excelente producción.

Para elaborar un informe completo y detallado del mantenimiento de los equipos que conforman la cámara de secado, se han creado unas fichas técnicas que auxiliaran las ordenes de trabajo del mantenimiento. Estas fichas ayudaran a la elaboración del informe del mantenimiento ya sean preventivo o correctivo.

El objetivo principal es proporcionar la información completa del estado del equipo para la toma de decisiones de la situación general de la cámara. Esta toma de decisión

tiene que ver con el presupuesto, los costos de secado, la producción de la empresa y el costo del mantenimiento.

Los documentos a presentar son los siguientes:

6.11 ORDEN DE SERVICIO

Es la base del mantenimiento y de esto depende el éxito del proceso. En ellos se maneja el código del equipo, el tipo de mantenimiento, la solicitud que se va a analizar, la prioridad, el tiempo del trabajo y el costo del trabajo en general.

6.12 HOJA DE VIDA DE LOS EQUIPOS

Es una recopilación cronológica de los trabajos realizados a los equipos. Contiene la información del estado del equipo, reparaciones hechas y los choques que hay que realizarse.

6.13 HOJA TÉCNICA

Muestra información general y específica del equipo en estudio, incluye también información sobre los tramites del equipo. Se divide en 3 partes; información general, especificaciones técnicas y transmisiones de este.

La información incluye: nombre y código del equipo, centro de costo, servicio que se presta, su uso (continuo, intermitente u ocasional), fecha de adquisición y de arranque, nombre y dirección del proveedor, marca del equipo, serial y costo del equipo.

Para mejorar esta infamación presentaremos las fichas descritas con el objeto de mostrar su contenido de información y su utilización:

Ver tablas anexas.

7. EVALUACION ECONÓMICA

La selección del sistema y método de secado mas apropiado a escala industrial, conlleva un análisis profundo de las implicaciones de orden económico que pueden afectar la rentabilidad de la empresa maderera interesada

Desde el punto de vista económico, una definición sobre el sistema mas apropiado exige el conocimiento previo de todos aquellos elementos que determinan el costo de secado, siendo los mas importantes los siguientes:

- Consumo anual de madera
- Tipos de productos que se elaboran
- Fuentes de energía y/o calor disponibles
- Maderas utilizadas, especie, espesor y precio
- Tiempos de secado, tanto para el caso de secado al aire como para el secado al horno.
- Perdidas de madera durante el secado.
- Mano de obra requerida y salarios
- Inversión en equipos y materiales.

El análisis en conjunto de estos factores suministra los elementos de juicio para la toma de decisiones sobre el método mas conveniente.

7.1 COSTOS DE FABRICACION

PROVEEDOR	CONCEPTO	VL. UNIT	CANT.	VL. TOTAL
Deposito Oriente	Cemento	1.700	60 B.	1.020.000
Inmunizadora Colombia	Tablilla Abarco	7.000	66 mt ²	455.000
Inmunizadora Colombia	Tabla Piso Algarrobo	15.000	78 mt ²	1.170.000
Deposito Oriente	Ladrillo 6 huecos	420	100	42.000
Inmunizadora Colombia	Madera Común 4 x 4 x 6 Vrs	15.000	15 maderas	2.250.000
Rodaorient	Rodamientos 6307 ZZ	9817.1	32	314.147
Aluminios y Más	Jamba económica	6.750	15	101.250
Ferretería la Rebaja	Bisagra taco 1 ½	2.100	16	33.600
Ferretería. Tornidin Ltda	Tornillos galvanizados 3/8"	484.8	32	15.516
Pintucolor	Pintura aluminio alta temperatura	72.000	6 gal.	432.000
Ferretería La Casona	Remaches POP.		2.000	90.000
Ferretería Industrial	Lamina Aluminio cal. 20	20.880	24 mt ²	501.120
Cia. Gral. de Aceros S.A.	Barra perforadora 101 x 63 x 36	15.575.3	32	498.410
Cia. Gral. de Aceros S.A.	Tramos eje 150 x 38.1 x A.1045	4.687.5	32	150.000
Ferrasa S. A.	Perfil C 3"	4.397.5	20	879.280
Ferretería La Casona	Soldadura 7018	4.442.8	20	88.856
Cryogas S.	Oxigeno	65.000	1	65.000
	Propano	25.000	1	25.000
Ferrasa S.A.	Lamina galvanizada Cal. 20	22.000	16	352.000

Ferrasa S.A.	Tubo rectangular 3" x 1½ x 6 cal. 18	21.111.1	9	190.000
Ferrasa S.A.	Tubo cuadrado 1½ x 6 cal. 18	15.000	4	60.000
Ferrasa S.A.	Angulo 1½ x ¼ x 6	17.500	16	280.000
Taller Las Playas	Maquinado de carros Transp.	26.562.5	32	850.000
Taller Las Playas	Construcción carros Transp.	34.375	16	550.000
Ferrasa S.A.	Tubería cobre 7/8 x 2 mt.	8.500	42	357.000
Ferrasa S.A.	Tubo 4" x 0.07 mt. Acero al carbonó	35.833.3	6	215.000
Jairo Gómez	Construcción puertas		8	400.000
Jairo Gómez	Construcción intercambiadores		3	600.000
	Construcción Obra Civil			700.000
Ferretería La Casona	Tubería, conos y accesorios			700.000
	Lana mineral			350.000
	Anticorrosivo	18.000	4	72.000
R y R Lubricantes	Aceite térmico			950.000
	Varillas			70.000
Siemns S.A.	Ventiladores	500.000	3	1.500.000
	Repotenciacion caldera			200.000
	Auxilio estudiante			<u>500.000</u>
INVERSION TOTAL INICIAL				<u>\$18.048.179</u>

Tabla 3

7.2 COSTOS DE MANTENIMIENTO

DETALLE	VALOR \$
Mantenimiento de radiadores cada 2 años	200.000
Mantenimiento de caldera cada año	400.000
Mantenimiento de la chimenea cada 2 años	100.000
Cambio de Aceite Térmico cada 2 años	950.000
Mantenimiento de ventiladores cada 7 años	200.000
Cambio de rodamientos a los carros transportadores cada 4 años	314.147
Mantenimiento de bomba cada 7 años	100.000

Tabla 4

La carga de calor de la cámara es $162188.54 \frac{\text{BTU}}{\text{hr}}$

La eficiencia de la caldera que se posee es de 60%

Eficiencia de una caldera $\frac{\text{Calor absorbido BTU/hr}}{\text{entrada de calor BTU/hr}}$

$$\text{Entrada de calor} = \frac{162188.54 \text{ BTU/hr}}{0.6} = 270314.23 \frac{\text{BTU}}{\text{hr}}$$

El poder calor frío de la madera a un 30% de humedad que es a la que llega cuando se

seca el aire es $6121 \frac{\text{BTU}}{\text{hr}}$

La carga de calor por hora que debe entregar la madera es $270314.23 \frac{\text{BTU}}{\text{hr}}$

Entonces necesitamos la masa que nos da esta carga, la calculamos así.

$$270314.23 \frac{\text{BTU}}{\text{hr}} = m (\text{poder calorífico})$$

$$270314.23 \frac{\text{BTU}}{\text{hr}} = m \ 6125 \frac{\text{BTU}}{\text{lb}}$$

$$m = 44.13 \frac{\text{lb}}{\text{hr}} * 24 \text{ hr} = 1059.19 \frac{\text{lb}}{\text{dia}} * 30 \text{ dias} = 31775.71 \frac{\text{lb}}{\text{mes}}$$

el desperdicio de madera se vende a 15 pesos la libra

$$\text{Costo combustible} = 31775.71 \frac{\text{lb}}{\text{mes}} * \frac{15 \text{ pesos}}{\text{hora}} = 476635.7$$

7.3 COSTO DE OPERACIÓN

Costo de llenado de la cámara.

El llenado de la cámara se hace en 4 horas, entre dos operarios, la empresa al liquidar la hora hombre en salario integral nos dio el resultado de 2075 la hora hombre.

$$\text{En el mes se hacen } 7.5 \text{ llenadas } \frac{30}{4} =$$

$$\text{Costo llenado mensual} = \frac{8 \text{ horas}}{\text{hombre}} * 2075 * 7.5 = 124500$$

Costo de transporte a la cámara

El transporte se hace manualmente desde la descortezadora a la cámara, se toma 6 horas para transportar la madera.

$$\text{Costo transporte mensual} = 6 \text{ horas} * 2075 * 7.5 = 93375$$

7.4 COSTO ABASTECIMIENTO CALDERA

2 horas al día x 2075 x 30 días

Costo mensual = 124500

7.5 COSTO SUPERVISIÓN Y MEDICIÓN MESUAL

$\frac{1}{2}$ hora al día x 2075 x 30 = 31125

7.6 COSTO DE ENERGÍA CAMARA

Se van a utilizar 3 ventiladores de 0.19 Kw y una bomba de 1.45 Kw. que trabajan continuamente.

Consumo de Kw $3 \times 0.19 \text{ Kw} + 1.45 \text{ Kw}$

La tarifa de compra de energía en la empresa es de 150 pesos $\frac{\text{Kw}}{\text{hr}}$

Consumo de energía mensual = $24 * 2.02 \text{ Kw} * 30 * 150 \frac{\text{Kw}}{\text{hr}} = 218160$

7.7 COSTO MATERIA PRIMA PARA PRODUCCION

c/u estación = 1800

Cantidad de estacones por secado 1690

Número de secador al mes = 7.5

Costo mensual madera a secar = $1800 * 1690 * 7.5 = 2281500$

7.8 VENTAS

Precio de venta de estación seco por unidad: 2800

Ventas mensuales = producción x precio unitario

Ventas mensuales = $12675 * 2800 = 35490000$

7.9 COSTO DE SECADO AL AIRE LIBRE

Costo patio de secado 2 000 000

Cambio plástico techo (cada 2 años) 350 000

7.10 COSTO DE TRANSPORTE AL PATIO DE SECADO

Al secar madera al aire libre se demorara 15 días para secar una producción de 1690, en un mes secará 3380 que equivalen a transportar 113 estacones diarios, de la descortezadora al patio de secado; estos 113 estacones se transportarán 2 horas.

Costo transporte aire libre mensual $2 \times 30 \times 2075 = 124500$

7.11 COSTO MATERIA PRIMA PARA PRODUCCION

c/u estación = 1800

Cantidad de estacones secados por mes = 3380

Costo mensual = $1800 * 3380 = 6084000$

7.12 VENTAS MENSUAL

$$\text{Venta mensual} = 3380 * 2800 = 9464000$$

7.13 COMPARACION DE ALTERNATIVAS

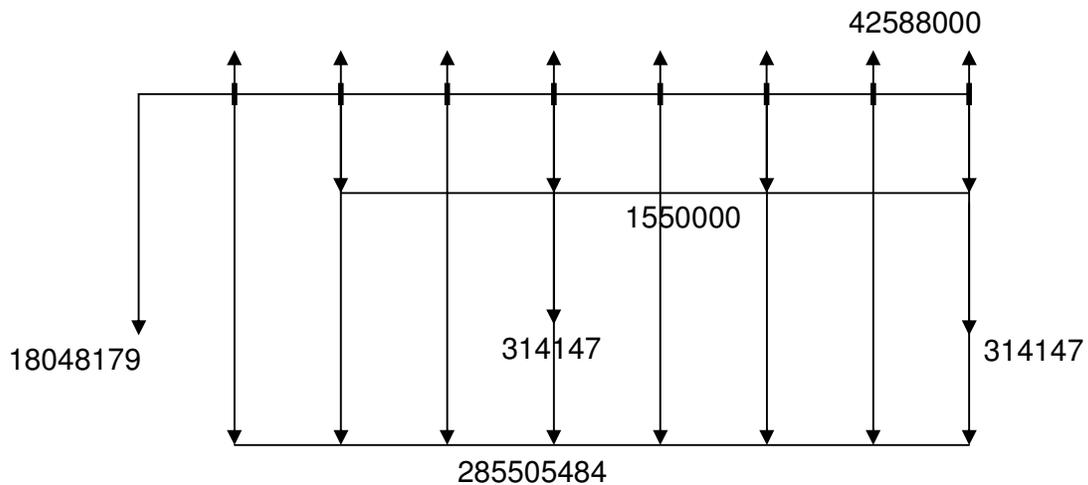
Para visualizar si valdría la pena construir la cámara, hacemos una comparación económica entre las dos alternativas mediante el VPN de ambas.

7.14 COSTO CÁMARA DE SECADO

La cámara de secado tiene una depreciación de 8 años. Tomaremos este lapso como el indicado para comparar ambas posibilidades, utilizamos un interés del 1.5 mensual.

Sumamos los gastos de cada año para llevarlos a una anualidad.

$$400000 + 476635.7 * (12) + 124500 * (12) + 93375 * (12) + 31125 * (12) + 218160 * (12) + 22815000 * (12) = 285505548.4$$



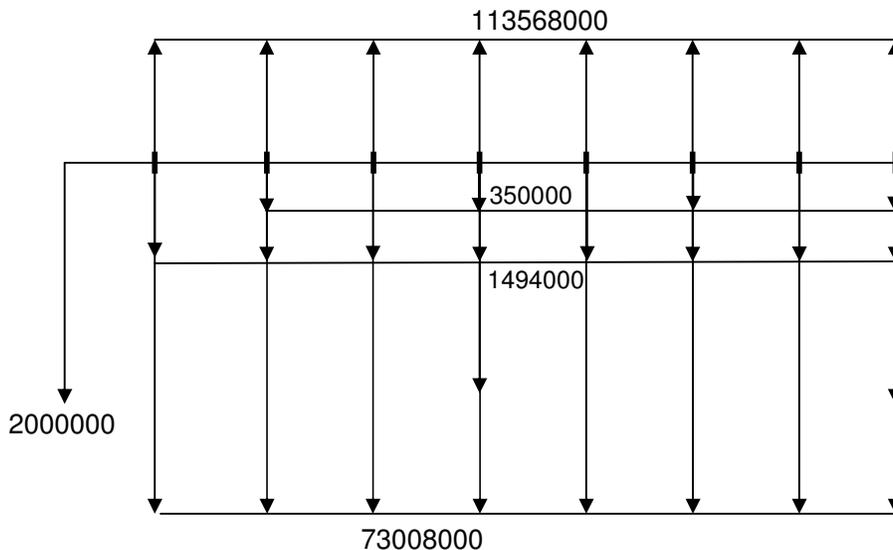
$$E = (1+0,015)^{12} - 1 = 0,195$$

$$E = (1+0,195)^{12} - 1 = 0,42$$

$$VPN = -18048179 - 285505548.4(P/A, 20,8) - 1550000(P/A, 42,4) \\ - 314147(P/F, 20,4) - 314147(P/F, 20,8) + 425880000(P/A, 20,8)$$

$$VPN = 517583661$$

7.15 SECADO AL AIRE LIBRE



$$VPN = -2000000 - 73008000(P/A, 20,8) - 1494000(P/A, 20,8) \\ - 350000(P/A, 42,4) + 113568000(P/A, 20,8)$$

$$VPN = 147274109.7$$

Al comparar las dos alternativas vemos que la mejor alternativa es la cámara de secado.

Para empresas que requieren del secado de mas de 1000 m³/año, se considera antieconómica la utilización del sistema de secado al aire libre. Si además se considera el hecho de que por el método de secado al aire libre solo se obtiene un contenido de humedad de equilibrio similar a las condiciones climáticas del patio de madera y que en muchos casos este contenido de humedad es demasiado alto para ciertas aplicaciones

industriales, se llega a la conclusión que desde el punto de vista técnico, es indispensable la utilización de hornos de secado.

Otro factor que favorece la utilización de hornos es el alto riesgo que representa el almacenamiento al aire de grandes cantidades de madera durante largos periodos de tiempo.

8. CONCLUSIONES

El diseño de la cámara de secado muestra la importancia del secado artificial en la industria de la madera. Por esta razón concluimos que las ventajas del secado artificial frente al secado al aire libre son muy grandes, ya que en el secado al aire libre hay ciertos factores del proceso que no se pueden controlar como en el proceso de secado artificial; tal es el caso de las condiciones climáticas, la humedad del ambiente y la velocidad del viento en general.

En el proceso artificial o secado en cámaras se puede secar la madera con condiciones climáticas ideales, controlando los factores mas importantes del proceso como son la humedad relativa, la velocidad del viento dentro del cuarto y la temperatura. Esta característica define el diseño de cámara que elaboramos y la gran ventaja que puede ofrecer este proyecto a la empresa INMUNIZADORA COLOMBIA S.A., ya que estará con una gran ventaja competitiva frente a otras empresas dedicadas al mercado de la madera, y podrá ofrecer sus productos con un sello de garantía y calidad.

9. RECOMENDACIONES

Teniendo en cuenta la elaboración de este trabajo procedemos a describir algunas recomendaciones especiales.

1. Para el buen funcionamiento de la cámara es importante que los operadores sigan paso a paso el correcto plan de operaciones.
2. Realizar el correcto mantenimiento a los equipos pertenecientes a la cámara con el fin de evitar inconvenientes durante el proceso de secado.
3. Se deben realizar inspecciones rutinarias para observar la cámara en general y diagnosticar su funcionamiento.
4. Revisar el sistema eléctrico quincenalmente para evitar sobrecargas en el sistema. Revisar redes eléctricas.
5. Se recomienda automatizar la cámara con el fin de controlar las variables del proceso de la mejor manera.

10. BIBLIOGRAFÍA

- DONALD, Kern. Procesos de Transferencia de Calor – Continental S.A.
Cap. 1, 2, 3, 5, 16.
- FAIRES. Diseño de Máquinas – Mc. Graw Hill. Cap. 15, 16
- JONES J. B. Ingeniería Termodinámica – Edit. Panamericana – Capitulo 9.
- JUNAC. Manual del Grupo Andino para el Secado de Maderas – 1ª. Edicion.
- JUNAC. Manual para el Tratamiento de Maderas – 1ª. Edicion.
- KREIT, Frank. Principios de Transferencia de calor – Mc. Graw Hill, -
Capitulos 5 y 8.
- MILLS, Anthony F. Transferencia de Calor – Mc. Graw Hill.- Cap. 4 y
- Seminario de Diseño y Construcción de Máquinas OUTSORSING, Universidad
EAFIT – Medellín.
- SCHAUM. Transferencia de calor – Mc. Graw Hill –