

SECADO DE MADERA CON MICROCONTROLADOR



JOSÉ RICARDO FRANCO VILLAMIL



Afiliada a la Asociación Colombiana de Universidades "ASCUN"

SECADO DE MADERA CON MICROCONTROLADOR

JOSÉ RICARDO FRANCO VILLAMIL

UNIVERSIDAD LA GRAN COLOMBIA
Seccional Armenia

SECADO DE MADERA CON MICROCONTROLADOR

JOSÉ RICARDO FRANCO VILLAMIL

ISBN: 978-958-8510-02-6

Ejemplares: 100

©Todos los Derechos Reservados

Año 2008

Revisión de Estilo:	Juan Manuel Acevedo Carvajal
Diseño Carátula:	Carolina Aguilar Londoño
Diagramación:	Arturo Latorre Ortiz
Impresión:	Centro de Medios Audiovisuales

HONORABLE CONSILIATURA

Germán Darío Ledesma López
Presidente

José Galat Noumer
Rector General

Carlos Alberto Pulido Barrantes
Secretario

Raúl Abril Cárdenas
Consiliario

Rafael Diazgranados Peñaranda
Consiliario

Eduardo Carvajalino Contreras
Consiliario

Roberto Herrera Soto
Consiliario

María Consuelo Castaño Triana
Consiliaria

Teodoro Gómez Gómez
Representante de los Profesores

Jeimy Cadena Duque
Representante de los Estudiantes

Myriam Luz Vargas
Revisora Fiscal

UNIVERSIDAD LA GRAN COLOMBIA Armenia

AUTORIDADES UNIVERSITARIAS

José Galat Noumer
Rector General

Jaime Bejarano Alzate
Rector delegado

Bibiana Vélez Medina
Vicerrectora Académica

Jorge Alberto Quintero Pinilla
Vicerrector Administrativo y Financiero

Ana Milena Londoño Palacio
Secretaria General

SECADO DE MADERA CON MICROCONTROLADOR
JOSÉ RICARDO FRANCO VILLAMIL

UNIDAD DE INVESTIGACIONES
UNIVERSIDAD LA GRAN COLOMBIA
ARMENIA
2008

CONTENIDO

INTRODUCCION	9
1. IMPORTANCIA Y CONCEPTOS BASICOS DEL SECADO DE LA MADERA	11
1.1 Estructura de la Madera	11
1.1.1 Partes del Tronco	11
1.1.2 Tejidos Principales de la Madera	12
1.2 Estado del agua en la Madera	12
1.2.1 Agua Libre	13
1.2.2 Agua de Saturación, Higroscópica o Fija	13
1.2.3 Agua de Constitución	14
1.3 Movimiento del Agua en la Madera	16
1.3.1 Fuerzas Capilares	16
1.3.2 Fuerzas Debidas a Diferencias en la Presión del Vapor	16
1.3.3 Fuerzas Debidas a Diferencias en el Contenido de Humedad	16
2. BASES FISICAS DEL SECADO DE LA MADERA	17
2.1 Temperatura	17
2.2 Humedad del Aire	17
2.2.1 Características del Aire	17
2.2.2 Presión del Vapor Saturado	18
2.2.3 Humedad Relativa	18
2.2.4 Medición de la Humedad Relativa	19
2.2.5 La Psicrometría	19
2.2.4.1.2 Sensores por Desplazamiento	20
2.2.4.1.3 Sensores de Bloque de Polímero Resistivo	20
2.2.4.1.4 Sensores Capacitivos	21
2.2.4.1.5 Sensores de Sal Saturada de Cloruro de litio	21
2.2.4.1.6 Determinación de la Humedad Relativa Mediante Cálculo	22
2.3 Velocidad del Aire	23
2.4 Contenido de Humedad de Equilibrio en la Madera	25
3. SISTEMAS DE SECADO	24
3.1 Secado Natural	24
3.2 Secado Artificial en cámaras o Hornos convencionales	26

3.2.1	Secado Artificial Convencional	26
3.2.2.	Secado por condensación-deshumidificadores	26
3.2.3	Secado en cámara de radiación solar	27
3.2.4	Secado en cámara de vacío	27
3.2.5	Secado por radiofrecuencia	28
4.	HORNO ARTIFICIAL CONVENCIONAL PARA SECADO DE MADERA	28
4.1	Estructura del Horno	28
4.1.1	Los Cimientos	29
4.1.2	Las Paredes	29
4.1.3	El Techo	31
4.1.4	El falso Techo	31
4.1.5	Los Pasillos Laterales	33
4.1.6	La Puerta	33
4.1.7	Las ventilas	34
4.2	Equipamiento del Horno para Secado de Madera	35
4.2.1	Sistema de Ventilación	35
4.2.2	Sistema de Calefacción	38
4.2.2.1	Dispositivos para el Control de la Temperatura	39
4.2.3	Sistema de Humidificación	39
4.2.3.1	Dispositivos para el Control de la Humedad Relativa	40
5.	AUTOMATIZACION DE UN HORNO PARA SECADO DE MADERA	41
5.1	Descripción General y Ubicación de los Dispositivos	41
5.1.1	Estructura	41
5.1.1.1	Aislamiento Térmico en la Estructura	41
5.1.1.2	Pérdidas de Calor en la Estructura	42
5.1.1.3	Pérdidas de Calor en la Estructura con Aislante	44
5.1.2	Sistema de Calefacción	46
5.1.3	Sistema de Ventilación	49
5.1.4	Sistema de Humidificación	50
5.1.5	Sistema de Control	60
5.1.5.1	Control de Temperatura	54
5.1.5.2	Control de Humedad Relativa	54
5.1.5.3	Control de Velocidad del Aire	55
6	CARACTERIZACIÓN DE SENSORES Y ACTUADORES	56
6.2.1	Consideraciones Generales	56

6.2.2	Sensores	57
6.2.2.1	Sensores de Temperatura	57
6.2.2.2	Sondas para Medir Contenido de Humedad	58
6.2.2.3	Determinación de la Humedad Relativa	59
6.2.2.4	Sensor de Contacto	59
6.2.3	Actuadores	60
6.2.3.1	Electroválvulas	60
6.2.3.2	Encendedores Eléctricos	62
6.2.3.3	Ventiladores	63
6.2.3.4	Motor AC	64
6.3	Acondicionamiento de Señales	65
6.3.1	Señales de Entrada	66
6.3.1.1	Sensores de Temperatura	66
6.3.1.2	Sondas para Contenido de Humedad	67
6.3.1.3	Entradas de Configuración o Interfaz con el Operario	68
6.3.2	Señales de Salida	69
6.3.2.1	Electroválvulas y Encendedor Eléctrico	69
6.3.2.2	Ventiladores y Motores AC	70
6.4	Modulo de Control	71
6.4.1	Secuencia de Control	72
6.4.2	Sistema de Alarma y Seguridad	75
6.4.3	Configuración, Interfaz con el Operario	76
6.4.4	Comunicación Serial	77
6.4.4.1	Software para Supervisión y Control por PC	78
6.4.4.2	Registro del desarrollo del Secado	79
6.5	Trabajos Futuros	79
6.6	Análisis de Costos	80
6.	CONCLUSIONES	84
	BIBLIOGRAFIA	85

INTRODUCCIÓN

La madera es un recurso natural que ha sido empleado por el hombre desde los primeros tiempos, primero como combustible para producir fuego, y más tarde para la fabricación de utensilios. Aún en la actualidad, la madera, por sus propiedades características, es un material empleado con fines muy diversos como la construcción de edificios, fabricación de muebles, objetos artesanos, papel, etc.

Para la fabricación de muebles, la madera requiere cada día mejores condiciones de calidad en cuanto a resistencia, durabilidad, fácil manipulación y procesamiento; condiciones que solo se logran mediante un proceso óptimo de secado.

La madera de tronco verde, al momento de serrarla por primera vez, contiene hasta dos tercios de su peso en agua, gran parte de la cual debe eliminarse de la madera antes de poder convertirla en productos útiles. El contenido de humedad de la madera verde puede ser superior al 100% (varía entre el 35 y 200% aproximadamente), dependiendo de la especie y las condiciones climáticas de la zona donde se desarrolla. La madera exige mucha atención, desde el momento en que se tala un árbol hasta que la madera aserrada se ha secado correctamente para el uso deseado. Sin embargo, si la madera se somete a un proceso de secado adecuado, se obtienen las siguientes ventajas:

1. El secado reduce la probabilidad de infestación de insectos, la aparición de moho y manchas y el deterioro durante el almacenamiento y uso de la madera. Los hongos y las termitas no pueden crecer en maderas cuyo contenido de humedad es inferior a 20%.
2. La contracción por el secado se completa antes de utilizar la madera, obteniéndose una estabilidad dimensional.
3. El secado reduce el peso y con esto el costo de transporte, aumenta la resistencia mecánica y propiedades como aislante térmico, acústico y eléctrico.
4. Sólo la madera relativamente seca se puede encolar, someter a acabado, labrar y tratar con químicos obteniendo buenos resultados.

En contraste con las propiedades mencionadas son muy pocos los factores limitantes de su uso, siendo los más determinantes la predisposición a la descomposición debido a su origen orgánico y la inestabilidad dimensional por ser un material higroscópico que se hincha cuando absorbe agua y se contrae cuando la pierde.

El secado de la madera puede lograrse de forma natural o por métodos especiales que estimulan la salida de agua de manera rápida y confiable. Cualquiera que sea el método utilizado, se debe buscar la mínima producción de defectos, menor tiempo de secado y costos aceptables.

Un horno automatizado, proporciona a la industria maderera la oportunidad de producir grandes volúmenes de madera seca en corto tiempo y sin sobre tensiones internas que puedan resultar en deformaciones, rupturas o pérdidas de la madera. Esto se logra manteniendo estables las condiciones climáticas dentro de la recámara o horno, midiendo y comparando la temperatura, humedad relativa y velocidad del aire con valores de referencia para cada tipo de madera.

En los mercados nacional e internacional cada día es mayor el requerimiento de utensilios y productos elaborados con madera con un bajo contenido de humedad, razón suficiente para optimizar los programas de secado actualmente utilizados, brindando un aporte a la industria para la fabricación de distintos productos utilizando materia prima con el contenido de humedad acorde con las necesidades del cliente.

Para empresas que requieren del secado de más de 1000m³ / año, se considera antieconómica la utilización del secado al aire libre. De ahí la tendencia a desarrollar sistemas que disminuyan el tiempo de secado para el rango de humedad entre la condición verde y el punto de saturación de las fibras.

El crecimiento de pequeñas y grandes empresas madereras en la región, brindan la posibilidad de un constante mercado para la creación de una empresa de secado de venta de equipos o alquiler del servicio.

1. IMPORTANCIA Y CONCEPTOS BASICOS ACERCA DEL SECADO DE LA MADERA

Uno de los procesos más exigentes en la preparación de la madera para usos industriales y domésticos es el secado. De hecho, de su correcto desarrollo depende que este material ofrezca buenos resultados durante y después del proceso de transformación.

Las consideraciones físicas y mecánicas de la materia prima así como las técnicas que se refieren al tipo y manejo de los equipos escogidos para esta práctica son aspectos fundamentales cuando se planea adelantar un secado, por eso a continuación haremos un recorrido por los conceptos asociados con este procedimiento.

Para comprender como seca la madera, es necesario, primero saber cuáles son las partes que constituyen el tronco del árbol.

1.1. ESTRUCTURA DE LA MADERA

La madera es el componente del tronco de los árboles que tiene como función el sostén de la planta y el transporte de alimentos para el crecimiento de éstos, lo que le da características de porosidad y gran resistencia mecánica.

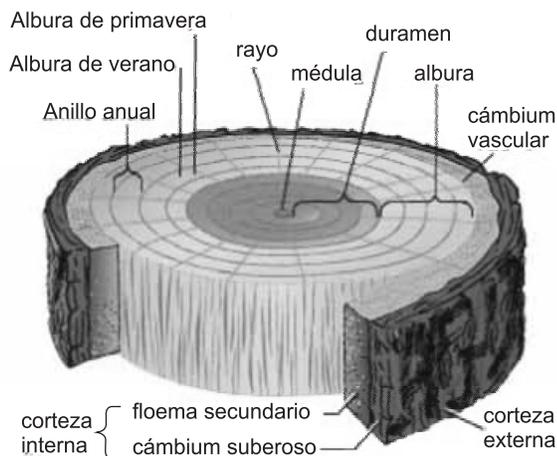


Figura 1.1. Partes de la madera.

1.1.1. Partes del Tronco

- **Corteza** es la cubierta protectora exterior y está conformada por tejidos muertos; sirve, además de proteger al árbol de agentes externos de daño, para evitar la evaporación del agua del tronco. En la figura 1.1 se pueden observar las partes del tronco.

- **El cámbium** es el tejido generatriz ubicado entre la corteza interna y el sámag, produce la corteza hacia afuera y la madera hacia adentro. Si se daña al cámbium, la parte afectada muere.
- **El sámag o jane**, parte viva de la madera generalmente de color claro, está situada entre el cámbium y el duramen. Su contenido de humedad es mayor que el del duramen pero, seca más rápidamente que éste.
- **El duramen o madera de corazón**, es la parte interna del tronco conformada por tejido muerto. Por lo general, esta madera es más oscura que la albura y su delimitación no siempre está bien definida.
- **La médula**, es el núcleo central de un tronco. La madera cercana a la médula tiende a secar con más defectos que el resto del leño.
- **Anillos de crecimiento**, son capas concéntricas de engrosamiento diametral, visibles en muchas especies, formadas por acción del cámbium.

1.1.2. Tejidos Principales de la Madera

Los tejidos básicos de la madera son:

- **Poros**, se denomina así al corte transversal de los vasos. Son de diferente tamaño y pueden estar o no agrupados.
- **Parénquima**, es un tejido de reserva que puede ser de dos tipos: longitudinal, un tejido blando y claro, y los radios que se dirigen al centro del tronco. Constituyen zonas de fallas donde se originan las grietas y rajaduras de la madera, durante el secado.
- **Fibras**, tejido que cumple la función de sostén del árbol; sus extremos son ahusados y el interior es hueco. Las paredes son de grosor variable, según la densidad de la madera.

1.2. ESTADO DEL AGUA EN LA MADERA

Uno de los aspectos a tener en cuenta en el proceso de secado es la densidad de la madera o dicho de otra manera, su peso y dureza, determinados por la cantidad de células existentes en su conformación; es decir, que a mayor número de células mayor dureza en la madera y a un menor número se tiene una madera más blanda, comparándolas ambas, en un mismo volumen. Así, la madera más densa es más difícil de secar que la menos densa debido a la mayor cantidad de paredes celulares que contiene.

Cuando un árbol está recién cortado, su madera contiene gran cantidad de agua, variando el contenido según la época del año, la región de procedencia y la especie forestal que se trate. Las maderas livianas, por ser más porosas, contienen una mayor cantidad de agua que las pesadas. En otras

palabras, el porcentaje de agua contenido en los espacios huecos y en las paredes celulares de la madera es muy variable en el árbol vivo.

La relación **Agua Total - Materia Seca Leñosa** es muy variable en una pieza de madera, ya que está sujeta a la influencia de varios factores, entre ellos, la estructura celular y el peso específico de la madera. Así, mientras el duramen no permite contenidos de humedad elevados debido a las sustancias infiltradas y contenidas en sus células, la albura puede acumular más del 100% de su peso en agua e incluso llegar a un 400% en aquellas maderas muy livianas como es el caso de los ALAMOS (*Populus* sp) y algunas especies de la familia Bombacaceae como el BALSÓ (*Ochrosia lagopus*) y la CEIBA BONGA (*Ceiba pentandra*).

El agua contenida en la madera se encuentra en forma de agua libre, agua de saturación y agua de constitución.

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

Al iniciarse el secado, el agua libre se va perdiendo fácilmente por evaporación, ya que es retenida por fuerzas capilares muy débiles, hasta el momento en que ya no contiene más agua de este tipo. En este punto, la madera está en lo que se denomina “punto o zona de saturación de las fibras” (PSF), que corresponde a un contenido de humedad entre el 21 y el 32%. Cuando la madera ha alcanzado esta condición, sus paredes celulares están completamente saturadas pero sus cavidades están vacías. Durante esta fase de secado, la madera no experimenta cambios dimensionales, ni alteraciones en sus propiedades mecánicas. Por tal razón, el PSF es muy importante desde el punto de vista físico-mecánico y de algunas propiedades eléctricas de la madera. La madera comienza a contraerse después que el contenido de la humedad es inferior al PSF.

1.2.2. Agua de saturación higroscópica o fija es el agua que se encuentra en las paredes celulares; también es llamada agua de inhibición. Existe la teoría de que el agua higroscópica está constituida por hidrogeniones fijados principalmente a los grupos hidroxilo de la celulosa y hemicelulosa y en menor proporción a los grupos hidroxilo de la lignina.

Durante el secado de la madera, cuando ésta ha perdido su agua libre por evaporación y continúa secándose, la pérdida de humedad ocurre con

mayor lentitud hasta llegar a un estado de equilibrio higroscópico con la humedad relativa de la atmósfera circundante.

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

1.2.3. 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 de secado. Su separación implicaría la destrucción parcial de la madera.

En la tabla 1.1, se muestran los porcentajes de contenido de humedad en la madera, recomendados para diferentes aplicaciones.

1.3 Movimiento del agua en la madera

Para iniciar un proceso de secado se debe determinar en primera instancia, la densidad de la madera, para lo cual se aplican varios métodos siendo el más popular y sencillo: la probeta. Esta consiste en tomar una pieza de madera para medirla en todas sus dimensiones, pesarla con precisión, y secarla en horno, poco a poco, hasta que ya no pierda más peso, después de lo cual se vuelve a medir y a pesar para determinar la contracción y comparar los nuevos datos contra el peso y el volumen inicial y determinar la densidad.

Pero... ¿Cómo seca la madera? ¿De qué forma es liberada el agua? ¿Tiene alguna dirección? ¿Hacia dónde se mueve el agua para este efecto?

Para resolver estos interrogantes, es necesario saber que el agua al interior de la madera se mueve desde las zonas más húmedas (interior) hacia las más secas (exterior) por capilaridad y difusión y que este mismo orden se da la remoción del agua de la superficie, razones por las que se afirma que la madera seca de adentro hacia fuera; de hecho, la superficie y las puntas de la madera al contacto con el aire, tienden a estar siempre más secas.

Si la temperatura y la humedad relativa del ambiente permanecen constantes, la madera se secará o absorberá humedad hasta que se establezca un equilibrio higroscópico. El movimiento del agua en la madera duran-

Uso de la madera	Contenido de Humedad	
	Promedio	
Madera, durmientes, postes , etc, para tratamiento con preservantes	25	agua libre extraida
Canastas y empaques de frutas	20	8-45
Madera para embarcaciones	12	12-15
Tanques y silos	12	12-18
Cajas	12	6-18
Revestimientos de autos	12	8-16
Piezas delgadas a revestimientos ext.	10	10-12
Ataúdes	9	7-12
Tablas para vigas y viguetas	8	6-20
Sillas y partes	6	5-12
Pisos	6	6-10
Muebles	6	4-10
Mangos	7	2-10
Mangos de brochas	5	2-10
Marcos, puertas, celosías, etc.	6	4-8
Instrumentos musicales, radios, cajas de piano	5	3-6
Hormas para zapatos	5	4-6
Lanzaderas, bobinas	5	4-6
Chapas y láminas		
- Caras	4	2-7
- Interior o relleno	5	2-6
- Venesta o triplay	6	2-9

Tabla N° 1.1. Porcentajes de humedad recomendados

te el proceso de secado es impulsado por varias fuerzas que pueden actuar simultáneamente. Estas son las siguientes:

1.3.1 Fuerzas Capilares

Son aquellas que ocasionan el movimiento del agua libre de una célula a otra, a través de las cavidades celulares, perforaciones, espacios intercelulares y radios medulares. Cuando una pieza de madera verde empieza a secarse, la evaporación del agua de las capas superficiales origina una fuerza de atracción sobre el agua libre de las células adyacentes. Esta fuerza de atracción hace que el agua libre del interior se mueva de una célula a otra, buscando la superficie de la pieza de madera.

Mientras el proceso de secado avanza y el agua libre de las cavidades celulares se elimina, la humedad que permanece en la madera se encuentra en forma de vapor en las cavidades celulares o en forma de agua higroscópica en los espacios intercelulares de las paredes celulares.

1.3.2 Fuerzas debidas a diferencias en la presión del vapor

Cuando cesa la atracción capilar, las cavidades celulares solo contienen aire y vapor de agua, generándose una presión de vapor que será proporcional al contenido de vapor en las cavidades. De esta forma, se tiene un valor máximo de presión hacia el centro de la pieza y decrece hacia la periferia.

La diferencia de vapor entre dos puntos, llamada gradiente de presión, es la responsable de que la humedad en la madera, en estado de vapor, migre de las zonas interiores hacia las exteriores que tienen una presión de vapor menor.

1.3.3 Fuerzas debidas a diferencias en el contenido de humedad

En las zonas cercanas a la superficie se crea un gradiente de contenido de humedad entre la superficie y el interior de la pieza. Las paredes más secas de las capas superficiales absorben la humedad de las paredes con un contenido de humedad más alto.

En el movimiento de humedad de madera del centro a la periferia, una molécula de agua se desplaza primero a través de una pared celular y sus conductos, debido a su gradiente de contenido de humedad, luego a través de una cavidad celular y sus conductos, debido al gradiente de presión del vapor. Este proceso se repite hasta alcanzar la superficie de la pieza de madera.

1. BASES FISICAS DEL SECADO DE LA MADERA

Tanto en el secado artificial como en el secado al aire, el agua es extraída de la madera por evaporación. La velocidad de evaporación es controlada por la temperatura, la humedad del ambiente y la velocidad del aire que pasa a través de la pila de madera a secar.

2.1 TEMPERATURA

El calor es la fuente de la que las moléculas de agua en la madera adquieren la energía cinética necesaria para la evaporación. La velocidad de ésta depende a su vez de la capacidad de energía suministrada por unidad de tiempo y de la capacidad del medio (aire), para absorber la humedad liberada por la madera. Por ello, 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 mayor humedad.

Hacia el interior de la tabla de madera, la temperatura condiciona también la velocidad del movimiento del agua, aumentando el coeficiente de circulación con un incremento de la temperatura. Así a 80 °C la velocidad del movimiento del agua al interior de la madera es aproximadamente cinco veces mayor que a 24 °C.

En el secado artificial convencional, el calor se transmite a la madera por convección. El efecto que podría 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 cámaras, al no existir la radiación directa.

En el secado al aire, cuando la madera está expuesta a la radiación directa del sol, la temperatura superficial de las piezas de madera puede llegar a ser muy superior a la temperatura del aire en circulación. Esta situación generalmente propicia condiciones de secado muy severas, que se manifiestan en defectos en la madera como torceduras, grietas, rajaduras en los extremos, etc.

2.2 HUMEDAD DEL AIRE

2.2.1 Características del aire

El aire comúnmente no está seco, sino que mezclado con una cierta cantidad de agua. Cuando el aire atraviesa un castillo de madera, varía la cantidad de agua y el volumen de la mezcla, pero la cantidad de aire seco se mantiene constante. Las Condiciones higrótermicas del aire o las propiedades de la mezcla vapor de agua-aire seco, es lo que se conoce bajo

el nombre de Psicometría. Entre las propiedades del aire que participan en el proceso de secado de la madera, se pueden mencionar, entre otras: a) humedad relativa, b) temperatura de bulbo seco, c) temperatura de bulbo húmedo, d) contenido de humedad de equilibrio. Otras propiedades del aire importantes son el punto de rocío, la humedad absoluta y la entalpía.

2.2.2 Presión de vapor saturado

El entendimiento del término presión de vapor saturado es necesario para comprender el secado de la madera. La presión de vapor determina el movimiento de la humedad y por lo tanto, la velocidad de secado en la madera.

Cuando se llega al punto en el cual el número de moléculas que se condensan es igual al número de las evaporadas (moléculas de un líquido que se convierten en vapor), se dice que la atmósfera, o espacio de aire encima de un líquido, está saturada. En este momento la concentración de las moléculas de vapor en la atmósfera produce o ejerce una presión parcial del vapor de agua, conocida como la presión de vapor saturado a una temperatura dada. Una disminución de la temperatura en el aire provocará la condensación parcial de vapor, resultando una presión de vapor baja; inversamente, un aumento de la temperatura conduce a una mayor evaporación del agua y la presión del vapor aumentará.

2.2.3 La humedad relativa

La humedad relativa del aire se define como la razón entre la cantidad real de aire que contiene y la máxima cantidad de agua que puede contener un determinado volumen de aire. Cuando el aire está seco, la humedad relativa es 0 % y si está saturado la humedad relativa es de 100 %. La humedad relativa del aire determina la velocidad del secado a cualquier temperatura dada, especialmente en madera más húmeda, por lo que es de la mayor importancia su adecuado control durante el secado de la madera. La humedad relativa se determina en el ábaco psicrométrico conociendo la temperatura de bulbo seco y la temperatura de bulbo húmedo o el contenido de humedad de equilibrio.

Matemáticamente se expresa por medio de la siguiente fórmula:

$$HR = \frac{P}{P_0} * 100 \quad (2.1)$$

2.2.4 Medición de la humedad relativa

Las mediciones de humedad relativa pueden ser hecha por sensores basados en: psicometría, desplazamiento, resistivos, capacitivos y por absorción de líquido.

2.2.5 La psicrometría.

La psicrometría es la parte de la meteorología que estudia las propiedades físicas y termodinámicas de la atmósfera. La humedad atmosférica es la cantidad de vapor de agua contenida en el aire y varía según las condiciones climatológicas, está presente en la troposfera (desde el nivel del mar hasta una altura media de 11 km) y varía de 0 a 25 % en volumen. Aire húmedo = aire seco + vapor de agua.

Desde hace tiempo es uno de los métodos más populares para el monitoreo de la humedad debido a su simplicidad e inherente bajo costo. El Psicrómetro es instrumento para determinar la humedad relativa del aire (cantidad de vapor de agua contenida en el aire, con relación a la cantidad máxima que sería capaz de contener a la misma temperatura); lo forman dos termómetros idénticos, uno con el bulbo descubierto para registrar la temperatura del aire, y otro con el bulbo cubierto con muselina que se mantiene húmeda como se muestra en la figura 2.1.

Para un funcionamiento correcto del psicrómetro es importante que se utilice agua destilada o agua de 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. Otra fuente de error puede presentarse cuando la fuente de agua, que humedece la tela, fluye rápidamente. Esta situación ocasiona el enfriamiento del bulbo húmedo hasta niveles muy cercanos a la temperatura del agua.

Principio de funcionamiento:

La evaporación desde la superficie del bulbo húmedo dentro de la corriente de aire enfría el bulbo hasta una temperatura estacionaria tal que haya un equilibrio entre el calor perdido por la evaporación y el ganado por la convección y radiación. Esta temperatura depende de la presión, temperatura y humedad de la atmósfera. Así pues cuando se dispone de un valor aproximado de presión, la humedad puede obtenerse a partir de las temperaturas observadas de los bulbos húmedo y seco

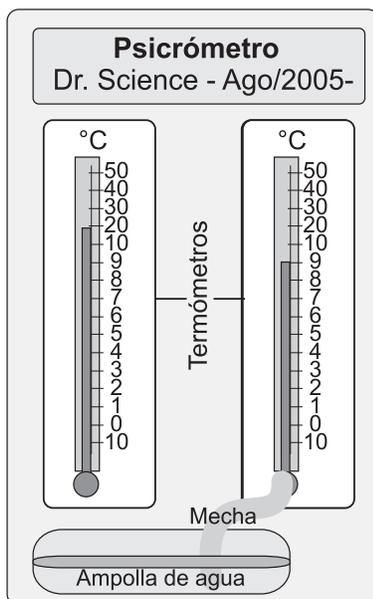


Figura 2.1. El psicrómetro.

2.2.4.1.2 Sensores por desplazamiento

Es quizás el tipo de sensor más antiguo y de uso común, utiliza un mecanismo para medir la expansión o contracción de un cierto material que es proporcional a los cambios en el nivel de humedad relativa. Los materiales más comunes son el nylon y la celulosa. Las ventajas de este tipo de sensor son el bajo costo de fabricación y que es altamente inmune a la contaminación. Las desventajas son la tendencia a la descalibración en el tiempo y los efectos de histéresis significativos.

El Higrómetro

Bajo condiciones naturales (intemperie) y para temperaturas inferiores a 80°C, la humedad relativa del aire se mide con el higrómetro. Este aparato se basa en la propiedad que tienen ciertas materias, como el cabello, de alargarse cuando el aire está húmedo y de contraerse si el aire está seco. La elongación o contracción se transmite, mediante un sistema de palancas, a una aguja que indicará en un dial la humedad del aire circundante.

2.2.4.1.3 Sensor de bloque de polímero resistivo

Están compuestos de un sustrato cerámico aislante sobre el cual se deposita una grilla de electrodos. Estos electrodos se cubren con una sal sensible a la humedad embebida en una resina. La resina se recubre entonces con una capa protectora permeable al vapor de agua. A medida que la humedad permea la capa de protección, el polímero resulta ionizado

y estos iones se movilizan dentro de la resina. Cuando los electrodos son excitados por una corriente alterna, la impedancia del sensor se mide y es usada para calcular el porcentaje de humedad relativa.

Por su misma estructura este tipo de sensores son relativamente inmunes a la contaminación superficial ya que no afecta su precisión aunque si el tiempo de respuesta. Debido a los valores extremadamente altos de resistencia del sensor a niveles de humedad menores que 25% es apropiado para los rangos altos de humedad.

2.2.4.1.4 Sensores capacitivos

Los sensores capacitivos (polímero orgánico capacitivo) son diseñados normalmente con platos paralelos con electrodos porosos o con filamentos entrelazados en el sustrato. El material dieléctrico absorbe o elimina vapor de agua del ambiente con los cambios del nivel de humedad. Los cambios resultantes en la constante dieléctrica causa una variación en el valor de la capacidad del dispositivo por lo que resulta una impedancia que varía con la humedad. Un cambio en la constante dieléctrica de aproximadamente el 30% corresponde a una variación de 0-100% en la humedad relativa.

El material sensor es muy delgado para alcanzar grandes cambios en la señal con la humedad. Esto permite a el vapor de agua entrar y salir fácilmente y el secado rápido para la sencilla calibración del sensor.

Este tipo de sensor es especialmente apropiado para ambiente de alta temperatura porque el coeficiente de temperatura es bajo y el polímero dieléctrico puede soportar altas temperaturas. Los sensores capacitivos son también apropiados para aplicaciones que requieran un alto grado de sensibilidad a niveles bajos de humedad, donde proveen una respuesta relativamente rápida. A valores de humedad superiores al 85% sin embargo el sensor tiene una tendencia a saturar y se transforma en no lineal.

2.2.4.1.5 Sensor de sal saturada de cloruro de litio

El sensor consiste de una bobina recubierta con una tela absorbente y un arrollamiento de electrodos bifilares inertes. La bobina es revestida con una solución diluida de cloruro de litio. Un corriente alterna se hace pasar por el arrollamiento y la solución salina causando calentamiento por efecto joule. A medida que la bobina eleva su temperatura el agua de la sal se evapora a una tasa que es controlada por la presión de vapor de agua en el aire circundante. Cuando la bobina comienza a secarse, la resistencia de la solución salina se incrementa produciendo una disminución de la

corriente que enfría la bobina. Este efecto de calentamiento y enfriamiento continúa hasta alcanzar un punto de equilibrio en el que no hay intercambio de agua con el ambiente. Esta temperatura de equilibrio es directamente proporcional a la presión de vapor de agua o el punto de rocío del aire circundante.

Los sensores de sal saturada resultan atractivos por el bajo costo, la resistencia ambiental, pero sus desventajas son el alto tiempo de respuesta y la moderada precisión.

2.2.4.1.6 Determinación de la humedad relativa mediante cálculo:

La humedad relativa es la humedad presente relativa (con respecto) a la máxima humedad posible a la misma temperatura ambiente (bulbo seco). Se define como la razón de: la presión de vapor de agua, presente en ese momento con respecto a la presión de vapor en saturación (de agua) a la misma temperatura. Se expresa como porcentaje.

$$HR = \frac{e(T)}{e_s(T)} \cdot 100\% \quad (2.3)$$

donde:

HR = humedad relativa en %,

$e(T)$ = presión parcial real del vapor de agua en aire húmedo, en Pa,

$e_s(T)$ = presión parcial de vapor de agua en aire húmedo saturado, en Pa.

Presión parcial de vapor saturado

Expresa el hecho de que a una temperatura dada, existe un máximo en la cantidad de vapor de agua que puede estar presente, en otras palabras es la máxima presión parcial $e_s(T)$ que puede ejercer el vapor de agua a una temperatura (bulbo seco) particular (T o t).

$$e_s(T) = 1\text{Pa} \cdot e^{\left(AT^2 + BT + C + \frac{D}{T} \right)} \quad (2.4)$$

donde:

$e_s(T)$ = presión parcial de vapor de agua en aire húmedo saturado en Pa, a la temperatura de bulbo seco T o t .

$e = 2,718\ 281\ 828\ 46$ = base de logaritmo natural

$A = 1,237\ 884\ 7 \cdot 10^{-2}$

$B = -1,912\ 131\ 6 \cdot 10^{-1}$

$C = 33,937\ 110\ 47$

$D = -6,343\ 164\ 5 \cdot 10^3$

$T =$ temperatura ambiente de bulbo seco en K. En $^{\circ}\text{C}$ $t = T + 273,15$

Presión parcial real de vapor de agua

De acuerdo con la ecuación de Ferrel, la cual es utilizada en el cálculo de la humedad relativa con el psicrómetro de giro:

$$e(T) = e_s(Tw) - P \cdot (T - Tw) \cdot (\psi + \varphi \cdot Tw) \quad (2.5)$$

O bien mediante la ecuación experimental de Carrier,

$$e(T) = e_s(Tw) - \frac{[P - e_s(Tw)] \cdot (T - Tw)}{\theta + \chi \cdot Tw} \quad (2.6)$$

donde:

$e(T)$ = presión parcial real de vapor de agua en aire húmedo en Pa, a la temperatura de bulbo seco T o t .

$e_s(Tw)$ = presión parcial de vapor de agua en aire húmedo saturado en Pa, a la temperatura de bulbo húmedo Tw ó tw .

P = presión atmosférica local en Pa

Tw = temperatura de bulbo húmedo en $^{\circ}\text{C}$ = $tw + 273,15$

Sustituyendo en la ecuación (1) tenemos que:

Ferrel:

$$HR = \frac{e_s(Tw) - P \cdot (T - Tw) \cdot (\psi + \varphi \cdot Tw)}{e_s(T)} \cdot 100\% \quad (2.7)$$

Carrier:

$$HR = \frac{\left[e_s(Tw) - \frac{[P - e_s(Tw)] \cdot (T - Tw)}{\theta + \chi \cdot Tw} \right]}{e_s(T)} \cdot 100\% \quad (2.8)$$

2.3 Velocidad

Además de la temperatura y la humedad relativa del aire, la velocidad de circulación del aire participa en la evaporación del agua durante el secado de la madera. Este factor, en una instalación de secado es generalmente constante y depende del tipo de secador y la especie a seca.

Contribuye a aumentar la velocidad del secado y su efecto es más importante para la evaporación del agua por sobre el punto de saturación de las fibras.

El aire transporta el calor necesario para la evaporación en la superficie de la madera y arrastra al exterior la humedad proveniente de esa evaporación.

Los mejores resultados se obtienen cuando la velocidad del aire es mantenida constante y uniforme a través de la madera, invirtiendo el flujo de aire cada cierto tiempo. El tiempo y la calidad del secado, pueden ser afectados con una velocidad del aire inadecuada o desuniforme.

2.4 Contenido de humedad de equilibrio en la madera

Todo cuerpo poroso en contacto con un 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 sean diferentes se puede afirmar que habrá transferencia de humedad del cuerpo al medio o viceversa. Cuando al cabo de cierto tiempo las presiones de vapor se igualan, se alcanza un punto de equilibrio que corresponde a un estado de humedad llamado de equilibrio del material.

De lo anterior se llega a que el equilibrio higroscópico en realidad corresponde al equilibrio entre las presiones parciales de vapor del aire del ambiente y de la pieza de madera. Cuando la madera alcanza el contenido de humedad de equilibrio (ECH) o humedad límite, la humedad de la madera no varía, no se puede liberar más humedad.

Para determinar los valores de humedad de equilibrio de la madera se varían los parámetros de humedad relativa y temperatura del aire dentro del secadero, a partir de estos valores, a presión atmosférica constante, se establecen los valores de la humedad de equilibrio de la madera correspondientes a cada condición dada.

3. SISTEMAS DE SECADO DE LA MADERA

En general, existen varios sistemas de secado basados, casi todos, en el principio antes descrito de equilibrado de la madera a las condiciones de la cámara, exceptuando el secado al vacío y el secado por radio frecuencia, sistemas cuyo principio y funcionamiento es muy diferentes a los tradicionales; pero los siguientes son los más empleados:

3.1. Secado natural

Es el primero, el más antiguo y es considerado por muchos, el mejor; de hecho se aplica frecuentemente en distintos lugares del mundo y para

diversos casos, pero en especial cuando no se cuenta con recursos para montar otros sistemas.

En realidad existen muchísimas maneras para secar naturalmente: desde los encastillados particulares o apilamiento de la madera hasta prácticas que incluyen creencias esotéricas y ambientales para obtener mejores resultado en el proceso.

Pese a lo popular de esta modalidad, el sistema tienen como principal inconveniente el elevado tiempo que demanda, difícil de establecer pues depende de variables como la cantidad de luz solar, la velocidad del viento, la exposición a puntos cardinales, la condensación y humedad relativa ambiental, entre otros, y la reducida homogeneidad en los resultados, pues no toda la madera seca de igual forma, razón por la que no se puede establecer con exactitud la humedad final que generalmente, no baja del 20 por ciento con éste sistema.

Este sistema de secado ha sido el más ampliamente utilizado. Sin embargo, por estar sujeto a cambios climáticos, no es posible ejercer control sobre su desarrollo.

En climas áridos, con humedad relativa muy baja, es casi imposible evitar los defectos causados por la pérdida rápida de humedad en la madera. En cambio en zonas de alta humedad relativa los defectos de secado no son ocasionados tanto por contracciones (grietas superficiales, rajaduras y deformaciones), sino más por hongos, dada la lentitud del proceso de secamiento.

Cuando la temperatura y la humedad relativa de aire permanecen constantes, la velocidad del aire es el factor determinante en el secado.

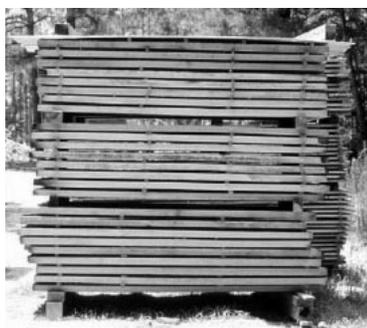


Figura 3.1. Secado Natural. Apilado horizontal.



Figura 3.2. Secado Natural. Apilado en caballete

3.2. Secado artificial en hornos o cámaras convencionales

Es la respuesta a las deficiencias del secado natural. Consiste en establecer en recintos cerrados condiciones climáticas estables diferentes a las condiciones atmosféricas normales. Mediante programas preestablecidos, según especie y dimensiones de la madera, se varían factores como la temperatura, humedad relativa y velocidad del aire.

Trabajan con temperatura media-alta y son las más usadas en el mundo, pues existe una gran variedad dentro del grupo, dependiendo de su configuración, aunque todas funcionan bajo un mismo principio.

Cuentan con una caldera de madera o carbón, que calienta el agua de 90° C a 100° C, para luego hacer pasar el líquido por unos intercambiadores de calor o radiadores (serpentes) instalados en el interior del horno, en donde también se instalan ventiladores de gran capacidad que generan una fuerte corriente de aire caliente, gracias al paso de éste por los radiadores.

La velocidad del secado se puede incrementar, elevando la temperatura tanto como sea admisible para cada especie en particular sin ocasionar daños de consideración.

Los métodos de secado artificial son:

3.2.1. Secado artificial convencional: se desarrolla en recintos cerrados dentro de los cuales se establecen climas artificiales progresivamente más cálidos y secos. El clima o etapa de secado depende de un programa predeterminado experimentalmente según el tipo y dimensiones de la madera. Los recintos se conocen como hornos o cámaras de secado.

3.2.2. Secado por condensación-deshumidificadores: estas cuentan con todos los elementos de las convencionales (ventiladores, humidificadores, controles, etc.) pero incluyen adicionalmente unos equipos similares a los de aire acondicionado, dotados de unos serpentines por los cuales se pasa el aire para que, en vez de calentarlo, se enfríe. De esta forma se condensa la humedad que a su vez, se elimina por conductos para ese propósito; sería algo parecido a la mezcla de “horno con nevera”. En la figura 3.4 se presenta un diagrama básico, con los componentes de un secadero por condensación.

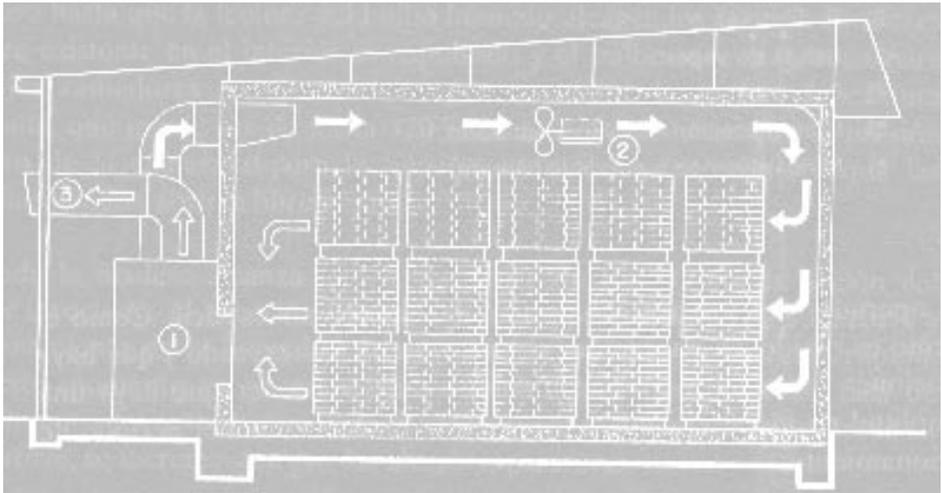


Figura 3.4. Diagrama de un secadero por condensación.

1. Equipo de condensación 2. Ventilador complementario 3. Intercambio del aire

3.2.3 Secado en cámara de radiación solar: funcionan aprovechando la energía calorífica del sol y la luz para ganar temperatura. En este grupo el mercado ofrece diversos tipos con varios grados de tecnificación (sensores de temperatura y humedad) y tamaños. La principal ventaja de estos sistemas es el menor consumo energético y el respeto por el medio ambiente. Sus desventajas: el proceso de secado se desarrolla más lentamente que usando cámaras convencionales o deshumidificadoras. Estas funcionan también controlando la temperatura y la humedad y empleando ventiladores para forzar las corrientes de aire tal como sucede con las cámaras convencionales.

3.2.4 Secado en cámara de vacío:

Parten de un principio de funcionamiento distinto a las anteriormente citadas, y que se resume en dos pasos aplicados consecutivamente hasta alcanzar la humedad deseada; primero, se aplica temperatura a la madera “inyectándola” a presión, para abrir el poro, luego se aplica el vacío succionando la humedad.

Estas cámaras que, generalmente se utilizan en cargas de madera relativamente pequeñas (no sobrepasan el metro cúbico aunque también las hay de mayor tamaño) y tienen un alto costo en el mercado. Su mayor ventaja es la reducción de tiempo en el proceso comparado con otros sistemas y que además garantizan la calidad de la madera, sin sufrir alteraciones.

3.2.5 Secado por radiofrecuencia: ideales también para cargas pequeñas, éstas operan totalmente diferente a todas las anteriores gracias a que el principio de la radio frecuencia es casi exactamente como el de un horno microondas: las células con agua son obligadas a vibrar con alta frecuencia, para generar un calentamiento de las células que evapore el agua. Gracias a este sistema se obtienen tiempos de secado verdaderamente rápidos, sin embargo, tanto el consumo de energía (único medio para su funcionamiento) como el costo de los equipos es muy alto.

Analizando las condiciones necesarias y el proceso de cada método, se pueden destacar tres razones, de orden técnico, que convierten la forma de secado artificial convencional en horno, en la mejor alternativa. Estas razones son:

- La necesidad de un área de secado reducida.
- Menor riesgo de ataque de hongos e insectos.
- La posibilidad de secar la madera a contenidos de humedad por debajo de la condición de equilibrio correspondiente a las condiciones climáticas del sitio.

Desde el punto de vista económico, para el secado artificial, algunas de las ventajas que merecen destacarse son una mayor velocidad de secado, la posibilidad de eliminar el volumen de madera en patios, mayor flexibilidad en las compras de madera, la disminución de las pérdidas de secado y la posibilidad de explotar la operación como fuente de utilidades, mediante la venta del servicio. Los procesos especiales no se ajustan a los requerimientos de aplicación del proceso a diversas especies de madera, de disminución de daños y de corto tiempo de secado. Cabe anotar, que los costos de implementación, puesta en servicio y funcionamiento de este tipo de sistemas de secado, son altamente elevados, por lo que no son muy aplicados en la industria.

4. HORNO ARTIFICIAL CONVENCIONAL PARA SECADO DE MADERA

4.1 ESTRUCTURA DEL HORNO

Las condiciones que imperan en un horno para secado de madera, cualquiera que sea su tipo, son muy severas. En efecto, la temperatura puede alcanzar hasta 130 °C; la humedad del aire es elevada, llegando incluso al 100%; la madera libera en el transcurso del secado, ácidos que atacan fuertemente las paredes de la cámara y los elementos fijados dentro de ella.

Por estos motivos, la construcción de una cámara para secado de maderas, debe cumplir con los siguientes requisitos:

- Buen aislamiento térmico.
- Construcción hermética.
- Uso de materiales resistentes a la corrosión y altas temperaturas.
- Utilización de puertas de fácil manejo y de cierre perfecto.

4.1.1. Los cimientos

En el diseño de una estructura los cimientos juegan un papel importante pues deben soportar el peso de paredes y techo. El subsuelo debe estar compuesto por piedra, una capa de hormigón de escoria (desperdicio) y el recubrimiento de hormigón cubierto con un material impermeable para evitar que la humedad del piso altere el clima del recinto (ver figura 4.1). El piso debe tener un desnivel con una pendiente del 1% dirigido hacia una canal de desagüe para asegurar un drenaje correcto.

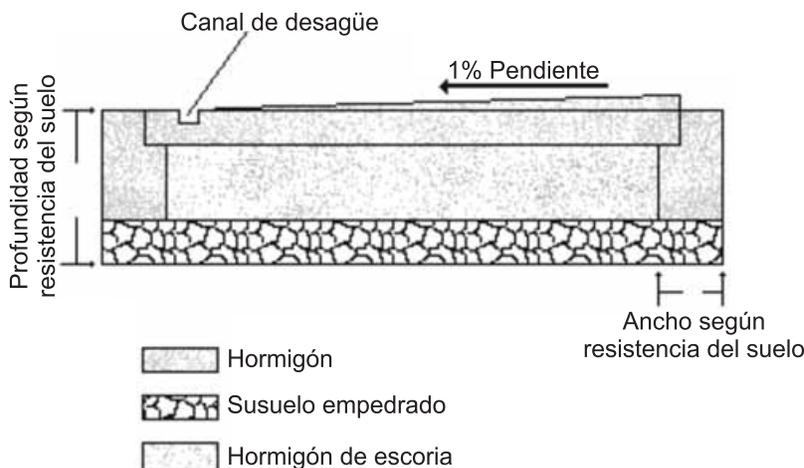


Figura N° 4.1. Cimientos del horno indicando desnivel del piso.

4.1.2. Las paredes

Las construcciones comunes tienen paredes con materiales como ladrillos de arcilla, adobe cocido o paneles metálicos de aluminio entre otros. Para la estructura del horno para secado de madera las paredes deben estar construidas en ladrillo de bloque hueco (tipo faról) que presenta un coeficiente de conductibilidad térmica inferior al del ladrillo macizo y al de cualquier metal. Esto favorece el aislamiento térmico, que debe ser reforzado con una capa de material que soporte altas temperaturas y porcentajes elevados de humedad, evitando así fugas de calor y la condensación en las paredes que pueden causar deterioro y pérdida resistiva en el ladrillo.

El aislamiento térmico se realiza con un fieltro de fibra de vidrio de 70mm de espesor. Este material es usado por poseer un coeficiente de conductibilidad térmica bajísimo ($\lambda = 0.028 \text{ Cal/m/h/}^\circ\text{C}$), esto es muy importante pues las pérdidas de calor son directamente proporcional al coeficiente de conductibilidad térmica, así entre más bajo sea éste, menores serán las pérdidas. La fibra de vidrio presenta como ventaja adicional una higroscopicidad muy débil, no absorbe agua y si se humedece accidentalmente, este material seca con rapidez. Esto se debe a que el agua escurre por sus fibras conservando íntegras todas sus propiedades.

Es necesario aislar las paredes de los cimientos para evitar grietas por diferencias térmicas de los materiales, esto se logra con un cartón con asfalto colocado encima de los cimientos, la ranura de dilatación entre las paredes y el piso se rellena con asfalto.

Para lograr una buena circulación del aire y lograr rápidamente de forma homogénea la temperatura de trabajo en el interior del horno, la cara interior se cubre, sobre el material aislante, con lámina lisa de aluminio de 0.5mm de grosor. El aluminio es el material utilizado en la construcción con el coeficiente de conductibilidad térmica más alto y su precio es bajo. Las características para la construcción de las paredes se detallan en la figura 4.2.

Los tornillos, arandelas, pernos y tuercas utilizados para fijar la lámina de aluminio en el interior del horno deben ser de un material resistente a la corrosión como el mismo aluminio. No es recomendable el uso de paneles o elementos de fijación en acero, debido al latente peligro de corrosión por el clima en el interior del horno.

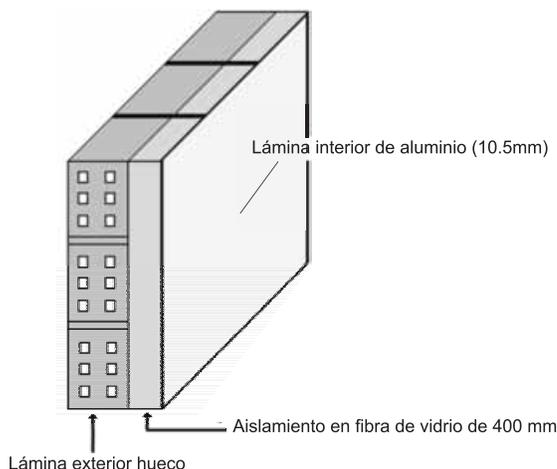


Figura 4.2 Estructura de las paredes del horno

4.1.3. El techo

En las edificaciones comunes se construye el techo en tejas en fibrocemento sobre listones de madera o sobre viguetas metálicas. En el horno para secado de madera el techo debe ser totalmente horizontal para permitir una mayor circulación del aire. Si el techo presenta alguna inclinación el flujo de aire se puede desviar y disminuir la velocidad dentro de la pila de madera. El techo debe construirse en concreto de 10cm de espesor para soportar el peso de los ventiladores y el falso techo. Para mejorar las condiciones de aislamiento basta solo con cubrir la superficie con el fieltro aislante en fibra de vidrio y luego con lámina de aluminio para mejor circulación del aire caliente.

Para impedir que por efectos de la lluvia se acumule agua sobre la superficie dando lugar al deterioro estructural del techo, se puede construir un arreglo con listones en madera o viguetas metálicas con un desnivel, que soporte tejas en fibrocemento o cinc permitiendo que el agua fluya sin acumularse sobre el techo.

Las esquinas interiores entre el techo y las paredes, y entre el piso y las paredes se deben redondear para lograr una mejor circulación del aire.

Al existir una gran diferencia entre la temperatura de la cara interna del techo o la pared y la temperatura ambiente en el exterior del recinto, el vapor de agua contenido en el aire se condensa al contacto con la capa de aire fría, dando lugar a la formación de humedades que, transformadas en gotas, producen el efecto de lluvia en el interior de los locales. La capa de fieltro aislante en fibra de vidrio impide que estas humedades afecten la estructura del horno, limitando los efectos de la condensación a la cara interna del horno para secado de madera construida en lámina de aluminio. Este efecto se maneja con el control de la temperatura y la humedad relativa en el recinto.

4.1.4. El falso techo

El falso techo 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 y los deflectores para orientar el aire. El falso techo debe tener un ancho igual al apilado de la madera y se prolonga a lo largo de todo el recinto. De esta manera los corredores laterales quedan libres para permitir la entrada y salida de aire de la pilas.

El diámetro de los ventiladores establece la altura del falso techo. A lo largo de este se cuelgan deflectores de 0.3 a 0.5m de ancho para sellar el

espacio entre la pila de madera y el falso techo obligando así al aire a pasar por la madera.

Una pila de madera verde sufre durante el secado forzosamente una contracción entre 3 y 10% en promedio dependiendo de la especie. Por ejemplo, una pila de madera de 3.6m de altura sufriría durante el secado un acortamiento de aproximadamente 0.29m, considerando una contracción del orden del 8%. En consecuencia, los deflectores deben tener un ancho suficiente para cubrir este espacio.

Como entre el techo falso y la pila de madera también está un sobre peso para evitar deformaciones en la madera, el ancho para del deflector, considerando el ejemplo anterior, debe ser el máximo dentro del rango establecido para este dispositivo, fijado en 0.5m como se muestra en la figura 4.3.

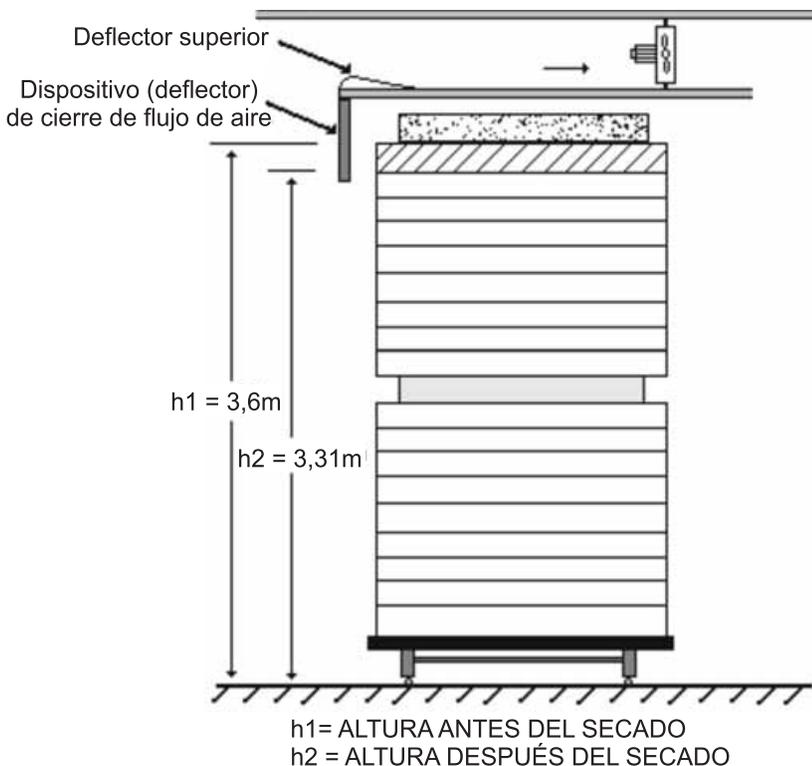


Figura 4.3. Cambio de altura de una pila de madera causada por la contracción durante el proceso de secado.

4.1.5. Los pasillos laterales

La función de los pasillos es permitir la circulación del aire, por ello se prolongan verticalmente desde el techo hasta las bases con esquinas redondeadas y con altura igual a los carros porta pilas. Lateralmente se extienden a lo largo de toda la cámara, entre las paredes y las pilas de madera. En ellos se colocan los sistemas de control, radiadores y el sistema de humidificación.

El ancho correcto de los pasillos laterales depende de la altura de la pila (cuanto más alta la pila de madera a secar, mayor deberá ser el espacio libre). Un secadero con una carga de 3.6m de altura y con ventiladores colocados encima de la pila, entre el techo y el falso techo, requiere para una correcta circulación del aire un espacio libre entre la pared y la carga de madera de 1.4 a 1.6m. El ancho del pasillo depende también de la velocidad de circulación del aire a través de la pila de madera.

4.1.6. La puerta

La puerta debe ser fácil de maniobrar, bien aislada y resistente a las condiciones climáticas del secador. El sistema de puerta de doble ala permite una rápida y sencilla operación de carga y descarga de las pilas de madera, además, ofrece un buen aislamiento, pues se puede disponer un empaque entre la puerta y las paredes del horno, dando como resultado un cierre hermético que minimiza las fugas de calor en la puerta. La puerta debe tener un ancho máximo de 5m (según HILDEBRAND R.F.A.) si es un sistema de doble ala como se especifica en la figura 4.4.

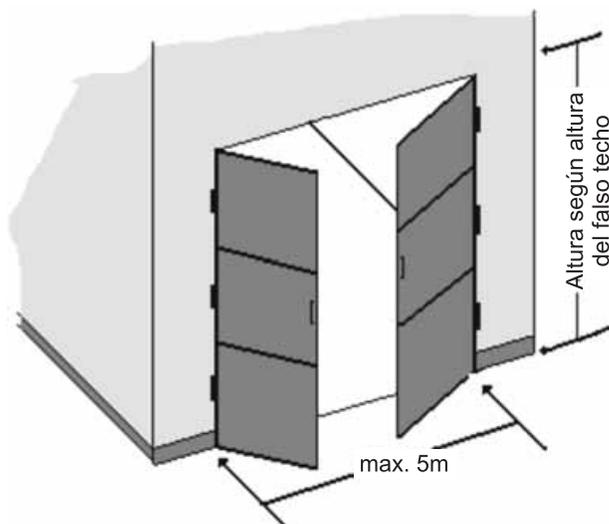


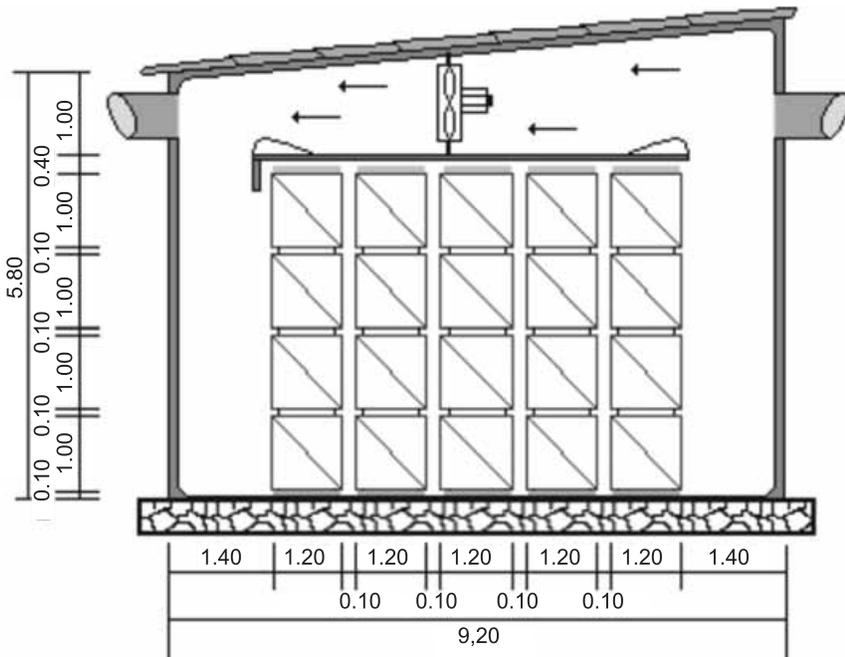
Figura 4.4. Sistema de puerta de doble ala.

4.1.7. Las ventilas

En el control de la humedad relativa en el interior del horno para secado de madera se hace necesario renovar el aire para eliminar el exceso de humedad en el aire, cumpliendo con los parámetros para los diferentes programas de secado. Las ventilas también permiten disminuir la temperatura en el interior del recinto.

Las ventilas pueden ubicarse sobre el techo o en la parte superior de las paredes, la disposición en el techo puede presentar inconvenientes en temporadas de lluvia, por esto es recomendable ubicarlas en la parte superior de las paredes. Cabe anotar que las ventilas también deben ser construidas en un material resistente a la corrosión, preferiblemente en aluminio puro.

Las siguientes gráficas (figura 4.5), muestran las dimensiones correspondientes, con los elementos necesarios, para un horno para secado de madera, según lo establecido para componente estructural. La capacidad del horno es de 60 paquetes por carga.



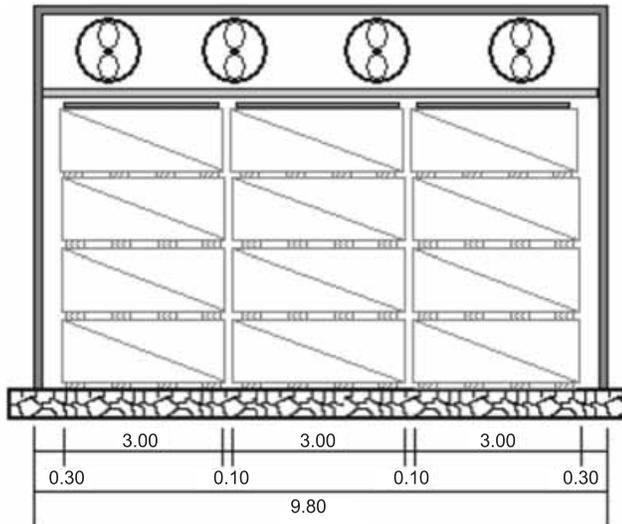


Figura 4.5. Dimensiones de un secadero industrial con capacidad de 60 paquetes por carga.

4.2 EQUIPAMIENTO DEL HORNO PARA SECADO DE MADERA

Un horno para secado de madera presenta varios procesos que conducen a obtener rápidamente un producto con el contenido de humedad deseado y sin deformaciones. Los factores que condicionan el secado de la madera son la temperatura, la humedad relativa del aire, la velocidad y presión del aire. Cada uno de estos factores depende, dentro del programa de secado, del contenido de humedad en la madera (CH) y para controlar de forma apropiada cada factor se tiene un sistema que permite alterar los valores de la variable controlada.

Por lo anterior, un horno para secado de madera, cualquiera que sea su principio de funcionamiento, debe contar con los siguientes elementos mínimos:

- Un sistema de ventilación que provoque la ventilación natural o forzada del aire.
- Un sistema de calefacción que proporcione calor a la cámara.
- Un sistema que permita la variación de la humedad relativa del aire.
- Dispositivos de control para variar las condiciones climáticas dentro del horno.

4.2.1. Sistema de Ventilación:

El aire dentro de la cámara de una secadora puede circular por gravedad (ventilación natural) o por medio de ventiladores que provocan una ventilación forzada.

Las secadoras que operan con el sistema de ventilación natural, se basan en el principio de que el aire caliente es menos denso que el aire frío y por lo tanto tiende a elevarse. Cuando este aire caliente es obligado a pasar a través de una pila de madera, cede calor a las piezas en la pila, se enfría por la absorción de humedad de la madera y se precipita hacia la parte inferior de la secadora.

Se crea así un movimiento vertical del aire cuya velocidad es muy lenta y que depende, sobre todo, de la diferencia de temperaturas entre la parte superior del horno y su piso o parte baja.

Si bien los hornos de ventilación natural son de construcción muy simple, presenta como desventaja la falta de uniformidad durante el proceso, lo cual trae como consecuencia un secado muy lento. En cambio, los hornos con ventilación forzada están provistos de ventiladores, que tienen por objeto aumentar la velocidad del aire y con ello acelerar el secado de la madera.

Es importante destacar que una buena ventilación es sinónimo de un buen secado, ya que juega un papel muy importante al principio del ciclo sobre la velocidad del secado y al final sobre la homogeneidad en el contenido de humedad de las piezas de madera en la pila.

El sistema de ventilación puede ser de ventilación lateral o con los ventiladores colocados sobre las pilas de madera. En la ventilación lateral, como se muestra en la Figura 4.6, los ventiladores se instalan entre una pared lateral y la pila. Los ventiladores son axiales, a veces de diámetro igual a la altura de la pila. No requieren un falso techo. El aire es proyectado horizontalmente, atravesando la pila de madera en dirección transversal.

Este sistema tiene como desventaja que la diferencia de velocidad del aire entre un lado de la pila y el otro es grande. Otro inconveniente es el efecto periférico, por lo que el flujo de aire es mayor hacia la periferia que hacia el centro del ventilador, donde la propulsión es nula. También hay que considerar que el aire tiene que hacer un largo recorrido antes de ser recalentado.

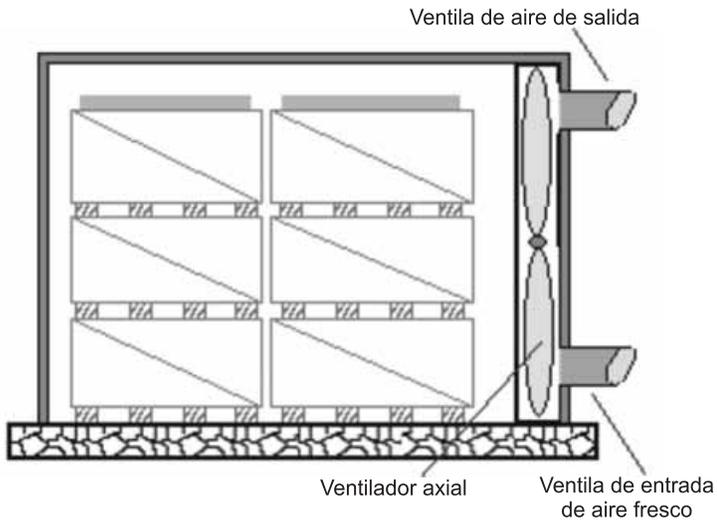


Figura 4.6. Secador convencional con ventilador lateral grande.

Cuando los ventiladores son colocados sobre las pilas de madera, en el falso techo que separa la madera del techo del recinto, pueden estar montados sobre un mismo eje longitudinal, que se extiende a lo largo de toda la cámara, o con motor individual en cada ventilador para circulación transversal como se muestra en la Figura 4.7. En la figura se representa la circulación del aire con ventilación transversal.

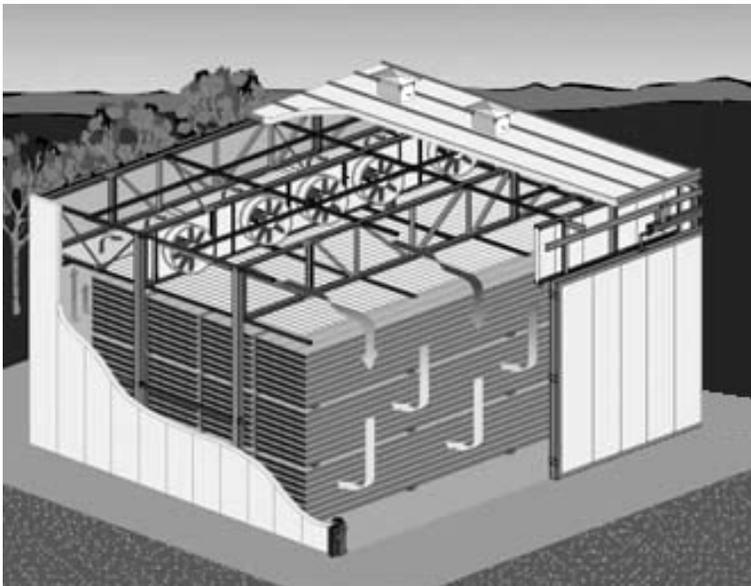


Figura 4.7. Esquema de ventilación con circulación transversal. Tomado de Industrias Incomac. Soluciones industriales, España

4.2.2. Sistema de Calefacción

El calor es necesario para elevar la temperatura en el horno y para asegurar que la difusión, o movimiento de la humedad desde el interior de la pieza de madera hacia la periferia, se mantenga o aumente. En términos generales la calefacción, en un horno para secado de madera, sirve para facilitar y acelerar la evaporación en la superficie húmeda de la madera y calentar el aire fresco que entra al horno para reemplazar el calor perdido por radiación a través de las paredes del horno.

Principales parámetros del sistema de calefacción, según la firma Hildebrand de Alemania, aprobado por el grupo andino en el Proyecto Subregional de Promoción Industrial de la Madera para la Construcción:

- Capacidad de calefacción perfectamente dimensionada, debe permitir el calentamiento del aire dentro del secadero de 20 a 80°C en aproximadamente 3 horas.
- La calefacción debe ser colocada y distribuida en tal forma que permita un calentamiento uniforme y un consumo mínimo de calor en el proceso de secado.

La temperatura óptima que debe aplicarse a una secadora depende sobre todo de la especie de madera a secar, su espesor, su contenido de humedad y su uso final. Como norma general debe aceptarse que durante el secado, la mayor economía se logra cuando se trabaja con la máxima temperatura que soporta la madera. Esto se debe a que el calor acelera la difusión de la humedad desde el interior hacia la superficie de la pieza de madera.

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, y las pérdidas por escapes.

La madera en el horno puede ser calentada de forma directa o indirecta. En forma directa la fuente de calor está próxima a la pila y éste se aplica directamente a la madera. De esta manera, se transmite rápidamente el calor, esto genera diferencias de tensión que se traducen en daños en la madera como agrietamientos y rajaduras, por tanto, este método de calentamiento no es utilizado para madera aserrada.

En hornos calentados indirectamente con petróleo, gas, carbón, madera o aserrín, los productos de la combustión son transportados por un siste-

ma de intercambiadores de calor, radiadores o chimeneas, localizado dentro de la secadora.

A continuación se emplea un cuadro comparativo (tabla 4.2), donde se analiza la eficiencia para cada fuente de energía usada en la calefacción de hornos para secado de madera.

FUENTE DE ENERGIA	CONSUMO	VELOCIDAD DE CALENTAMIENTO	COSTO DEL SISTEMA
PETROLEO	BAJO	ALTA	ALTO
GAS	BAJO	ALTA	BAJO
CARBON	ALTO	BAJA	MEDIO
MADERA O ASERRIN	ALTO	MEDIA	MEDIO

Tabla Nº 4.2. Eficiencia de las distintas fuentes de energía usadas en la calefacción de hornos.

4.2.2.1. 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 el psicrómetro. Se controla automáticamente por medio de electroválvulas o válvulas neumáticas, que abren o cierran el paso al medio de calefacción según las necesidades del programa de secado.

El bulbo sensor se localiza en la parte media de la cámara, en uno de los pasillos laterales; debe situarse en el pasillo de entrada de aire colocado paralela o perpendicularmente a la pared, en un sitio donde la circulación del aire no esté obstruida.

4.2.3. Sistema de humidificación

La humedad del aire es un factor importante para el control del contenido de humedad en la madera, ya que este afecta el gradiente de humedad y la contracción en la pieza a secar. Por lo anterior, la humedad del aire, tiene una relación directa con los esfuerzos al interior de la pieza que pueden conducir a la aparición de defectos como torceduras y rajaduras. Conjuntamente con la temperatura, determina la velocidad del secado y el contenido de humedad de equilibrio que puede alcanzarse bajo cualquier programa específico de secado.

La humedad relativa, dentro del horno, se controla por medio de una inyección de vapor o por rocío de agua; esto para aumentar la humedad relativa y para disminuirla, se emplean las ventilas. Por medio de las ventilas, se elimina la humedad condensada en la parte superior del horno e ingresa al secador aire fresco que debe ser calentado.

Cuando no se cuenta con un sistema rociador, dependiendo totalmente de la humedad que se evapora de la madera para el mantenimiento de la humedad deseada en el horno, no se puede ejercer control estricto sobre la humedad de la cámara, por lo cual es difícil secar la madera a un contenido de humedad uniforme y libre de esfuerzos internos.

El control total de la humedad conlleva el control de la temperatura, tanto en el bulbo húmedo como en el bulbo seco (psicrómetro). Esto se hace por regulación del calor, rociadores y de las ventilas, operación que debe efectuarse de forma automática pues un control eficaz de tantos factores distintos (temperatura, humedad relativa dentro del secadero e intercambio de aire), no pueden realizarse manualmente sin poner en peligro la madera a secar o sin prolongar en forma excesiva el tiempo de secado.

4.2.3.1. Dispositivos para el Control de la Humedad Relativa.

La humedad relativa del aire dentro de un secador se puede medir con un psicrómetro, verificando la diferencia de lecturas entre los termómetros de bulbo seco y húmedo.

La lectura del termómetro de bulbo húmedo debe ser lo más precisa posible. Esto implica que el recipiente de agua y la mecha de algodón o gasa que lo mantiene húmedo, deben estar libre de incrustaciones que alteren la lectura. Los dos bulbos deben ubicarse en el mismo sitio.

La inyección de humedad al interior de las cámaras es necesaria solo en pocas etapas del proceso. Algunas veces, al comienzo del secado y en las etapas intermedias, se aplican tratamientos para prevenir daños ocasionados por tensiones de secado. Al final del secado, cuando se aplica el tratamiento de homogenización de la humedad y equilibrado de tensiones, casi siempre es indispensable rociar agua para incrementar la humedad relativa.

5. DISEÑO DE HORNO AUTOMATIZADO

5.1 DESCRIPCIÓN GENERAL Y UBICACIÓN DE LOS DISPOSITIVOS

Para la etapa de automatización de un horno convencional para secado de madera se aplica un programa de secado preestablecido, lo que permite variar de forma controlada el clima dentro de la cámara y así conducir la madera hasta su estado anhidro.

Las características propias del sistema de secado artificial en horno convencional, superan las de sistemas con deshumidificadores o procesos especiales, en cuanto al corto tiempo de secado, bajos contenidos de humedad finales (<12%), variedad de especies a secar y bajo costo. Una de las grandes ventajas del sistema de secado artificial convencional es la posibilidad de controlar todas las variables críticas del proceso como temperatura, humedad relativa, contenido de humedad y velocidad del viento, haciendo del proceso de secado una tarea automatizada que no requiere supervisión permanente por parte del operador.

En un secadero automatizado, la seguridad es un aspecto primordial, pues en el secado convencional se manejan presiones de vapor de agua, que a las temperaturas de trabajo, podrían causar daños en la estructura y lesiones permanentes en las personas que operen o controlen los sistemas del horno. De esta manera, la automatización ofrece la ventaja de conducir por medio de un programa preestablecido, el secado de una carga de madera de forma segura y eficaz.

5.1.1 Estructura

La estructura de un horno para secado de madera debe resistir las condiciones climáticas extremas que se presentan en el interior de la cámara. Es así, como los materiales utilizados deben soportar elevada temperatura (entre 60 y 80°C) y altos porcentajes de humedad relativa, estas condiciones climáticas que podrían hacer colapsar una estructura.

En la estructura, principalmente en las paredes, se presentan pérdidas de calor que significan mayor tiempo de secado y un incremento significativo en los costos del proceso, esto debe evitarse con el uso de un aislante apropiado y manteniendo lo más lisa posible la superficie interna del horno.

5.1.1.1 Aislamiento térmico en la estructura

Un buen aislamiento permite la climatización del horno debido al efecto regulador en la temperatura ambiente de los mismos. Al suprimirse los

efectos que los bruscos cambios de temperatura pueden causar, un buen aislante hace factible el estudio, determinación y puesta en práctica de cuadros de temperatura óptimamente calculados para el mejor desarrollo del proceso productivo.

Un buen aislamiento evita las condensaciones, pues mantiene las superficies interiores de paredes y techos, muy próximas a la temperatura del horno, superiores por tanto al valor del punto de rocío, límite mínimo de temperatura determinante de la condensación.

El aislante térmico utilizado en cualquier horno es la fibra de vidrio utilizada en forma de relleno entre la pared, en ladrillo hueco tipo farol o ladrillo térmico, y la lámina de aluminio que ayuda a la circulación del aire dentro del horno manteniendo uniforme la temperatura en el mismo. El espesor de esta capa es de 40mm, que es lo recomendado para aplicaciones de tipo industrial dentro del rango de temperaturas de trabajo del horno para secado de madera [SAN91].

5.1.1.2 Pérdidas de calor en la estructura

El análisis se realizará considerando una de las temperaturas de trabajo más altas utilizadas en el horno, establecida 70°C.

Paredes.

- Material: Ladrillo hueco tipo farol con revoque.
- Coeficiente de transmisión de calor [SAN91]: $K=2.5 \text{ Cal/m}^2/\text{°C}$ Techo.
- Material: Tejas sobre listones sin revestimiento ni cubrejuntas.
- Coeficiente de transmisión de calor: $K=10 \text{ Cal/m}^2/\text{°C}$

Área de las paredes (figura 6.1):

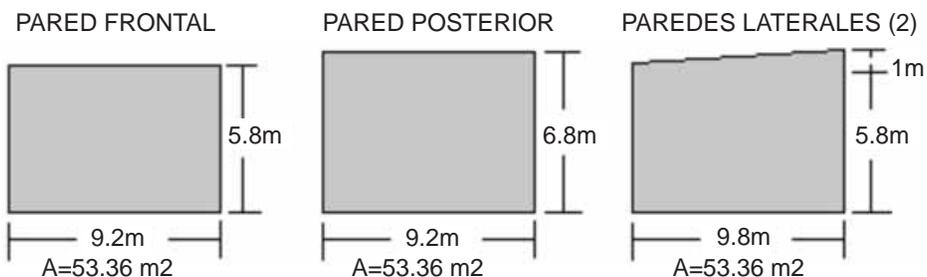


Figura 6.1. Áreas de las paredes de un horno convencional para secado de madera.

Área total de las paredes: $S_p = 232.44m^2$

Entre un medio que está a una temperatura determinada t_1 °, y otro que está a una temperatura inferior t_2 °, separados ambos por una pared de superficie S m², se produce cada una hora un flujo de calor Q^{cal} dado por la siguiente fórmula:

$$Q = KS(t_1 - t_2) \quad (6.1)$$

El coeficiente K, es el coeficiente de transmisión de calor de la superficie considerada.

Para las paredes se tiene:

$$Q^{cal} = (2.5Cal / m^2 / ^\circ C) * (232.44m^2) * (70^\circ - 25^\circ)$$

$$Q^{cal} = 26.149,5 \frac{Cal}{h}$$

Las pérdidas referidas a un mes (720 h):

$$Q_{mes} = 18'827.640 Cal$$

Área del techo (figura 6.2):

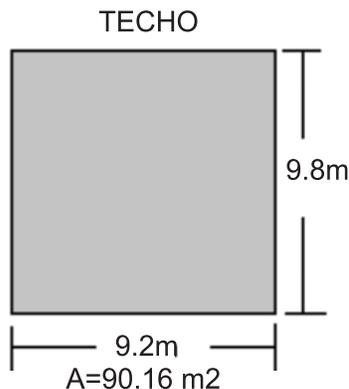


Figura 6.2. Área del techo de un horno convencional. Para el techo se tiene:

$$S = 90.16m^2$$

$$Q^{cal} = 10Cal / m^2 / ^\circ C * (90.16m^2) * (70^\circ - 25^\circ)$$

$$Q^{cal} = 40.542 \frac{Cal}{h}$$

Las pérdidas referidas a un mes (720 h):

$$Q_{mes} = 29'211.840Cal$$

El total de perdidas en la estructura, por fugas de calor, referidas a un mes es:

$$Q_{TOTAL} = 48'039.480 \frac{Cal}{mes}$$

5.1.1.3 Pérdidas de calor en la estructura con aislante

Para el aislamiento térmico de este tipo de estructuras se utilizan fieltro de fibra de vidrio.

- Espesor: 40mm (e1)
- Coeficiente de conductibilidad térmica: 0.028 (l1)

Con el aislante la nueva constante de transmisión de calor viene dada por:

$$\frac{1}{K_1} = \frac{1}{K} + \frac{e_1}{\lambda_1} \quad (6.2)$$

e1= espesor del aislante en metros.

1= coeficiente de conductibilidad térmica del mismo.

Para las paredes:

$$K_1 = \frac{1}{\left(\frac{1}{K} + \frac{e_1}{\lambda_1} \right)} \quad (6.3)$$

$$K_1 = \frac{1}{\left(\frac{1}{2.5} + \frac{40 \times 10^{-3}}{0.028} \right)} \quad K_1 = 0.547Cal / h / m^2 / ^\circ C$$

Las pérdidas en las paredes, referidas a un mes, usando la ecuación N° 6.1, son:

$$Q_{mes} = 4'119.488 \frac{Cal}{mes}$$

Para el techo

Determinado la nueva constante de transmisión de calor, con la ecuación N° 6.2:

$$K_1 = 0.654 Cal / h / m^2 / ^\circ C$$

Y las pérdidas en el techo, referidas a un mes, usando la ecuación N° 6.1, se tiene que son:

$$Q_{mes} = 1'920.202 \frac{Cal}{mes}$$

El total de perdidas en la estructura, con aislante térmico en fibra de vidrio de 40mm de espesor, referidas a un mes es:

$$Q_{TOTAL} = 6'039.690 \frac{Cal}{mes}$$

De lo anterior, se puede observar una recuperación de energía usando el aislamiento térmico de 41'999.790 *Cal/mes*, que equivale a una recuperación del 87,43%.

El poder calorífico (Pc) del gas natural es de

$$1000 \frac{BTU}{p^3} \text{ ó } 35.314,67 \frac{BTU}{m^3}, \text{ y}$$

$$1BTU \equiv 252Cal$$

el poder calorífico del gas, también se puede expresar como:

$$Pc = 8'899.298 \frac{Cal}{m^3} \quad (6.4)$$

lo que representa, para la recuperación de energía lograda con el aislamiento térmico, un ahorro mensual de 5m³ de gas natural. Esto representa un beneficio extra del aislamiento en fibra de vidrio, cuya principal ventaja es que evita condensaciones que deterioran la estructura.

5.1.2. Sistema de calefacción

Los dispositivos y sustancias utilizadas para calentar el horno deben ser elementos confiables cumpliendo con las normas de uso e instalación, en el caso de productos como el gas natural o aceites. El horno automatizado contará con un medio de calentamiento basado en quemadores de gas dispuestos a lo largo del horno entre el piso y una superficie en lámina de platina que soporta el peso de las pilas de madera y mantendrá una distribución uniforme del calor dentro del secadero. Esta superficie es necesaria para que la llama no llegue directamente a la madera y cause defectos por elevados gradientes de humedad y quemado en la superficie de la madera.

La superficie en platina, de $\frac{1}{4}$ de pulgada, está dispuesta en secciones de 1m^2 , con soportes metálicos que permitan una distancia de 40cm entre el piso y la lámina de platina para que entre un volumen de aire suficiente que mantenga en combustión el gas en los quemadores, como se indica en la figura 6.3. Esta superficie se convierte en un factor estructural de suma importancia, pues sobre esta superficie se apoyarán las pilas de madera.

El suministro de gas está regulado por una electroválvula, que mediante de una señal proveniente del controlador, permite el paso del fluido y activa los encendedores eléctricos manteniendo la temperatura de acuerdo al programa de secado.

Los quemadores tipo flauta permiten cubrir grandes superficies, logrando rápidamente la temperatura establecida según el programa de secado. Los quemadores tipo flauta son tubos con pequeños orificios a lo largo. La conexión de los quemadores se hace mediante una boquilla o fistón en cobre que aumenta la presión de salida reduciendo el consumo de gas. La conexión debe estar provista de un acople con orificio que permite la ventilación dentro del quemador, evitando que éste se dilate o reviente. En la figura 6.4 se muestra la forma de conectar los quemadores a la flauta.

Para mantener la temperatura dentro del secadero, es necesario medirla permanentemente y de acuerdo a esta medida permitir o no el paso del gas a los quemadores.

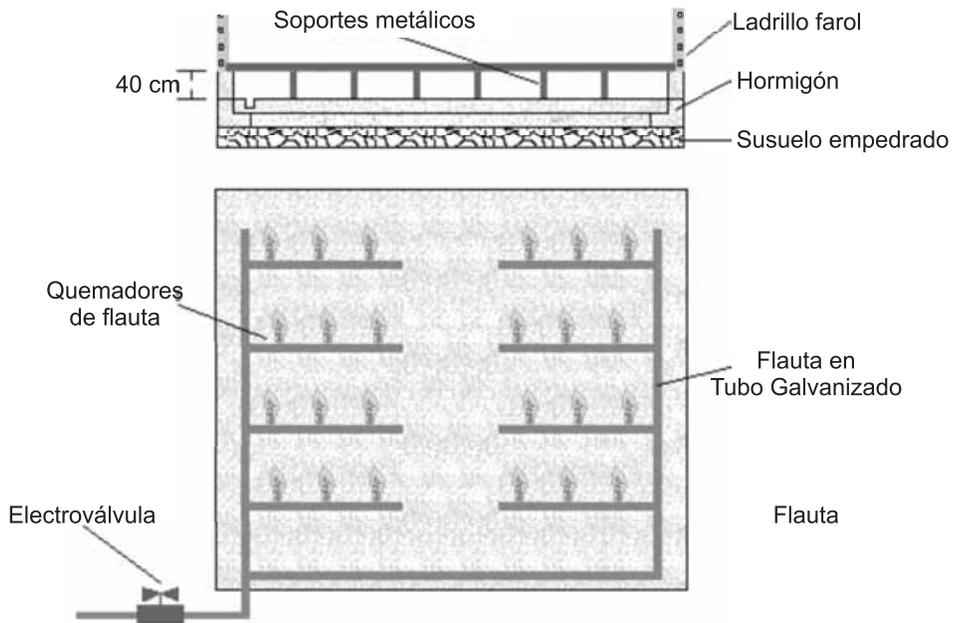


Figura 6.3. Arriba: Vista lateral del piso y la superficie en platina.
Abajo: Disposición de los quemadores en flauta (vista superior).

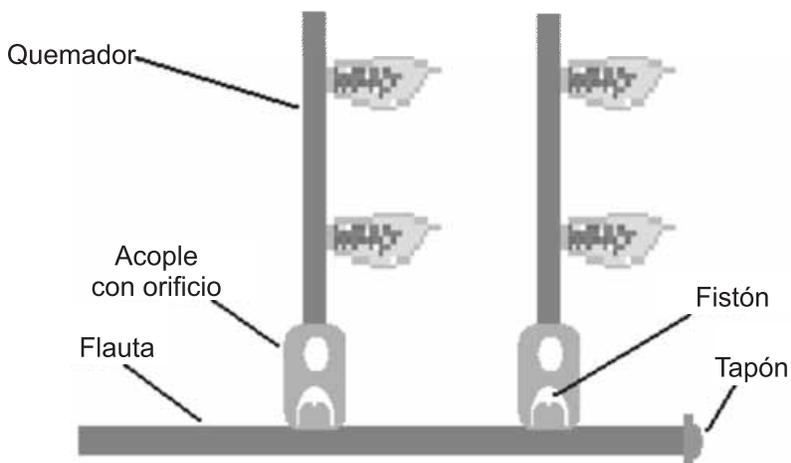


Figura 6.4 Conexión de quemadores a flautas alimentadoras. Nótese el acople con orificio para ventilación de los quemadores.

La temperatura dentro del horno es regulada por medio de un sistema de control que captura una señal proporcional a la temperatura real dentro del horno y, con un rango de tolerancia de 2°C, actúa sobre la electroválvula y los encendedores eléctricos proporcionando una llama continua hasta alcanzar la temperatura adecuada según la etapa del proceso de secado. La ubicación de los sensores de temperatura se especifica en la figura 6.5, donde los termómetros de bulbo seco y de bulbo húmedo, necesarios para determinar la humedad relativa, están situados en el pasillo lateral por el cual entra el aire a la madera. Esta disposición de los sensores permite mayor sensibilidad ante cambios de temperatura dentro del horno.

La temperatura es una variable determinante en el proceso de secado, entre más alta sea la temperatura aumentará el gradiente de secado y el proceso será más rápido. Mediante un sistema controlado de calefacción con buena calibración se puede aumentar la temperatura hasta el máximo permisible, según especie y etapa del proceso de secado, sin causar daños en la madera y aumentando la eficiencia del secadero en cuanto a tiempo de secado y calidad del producto.

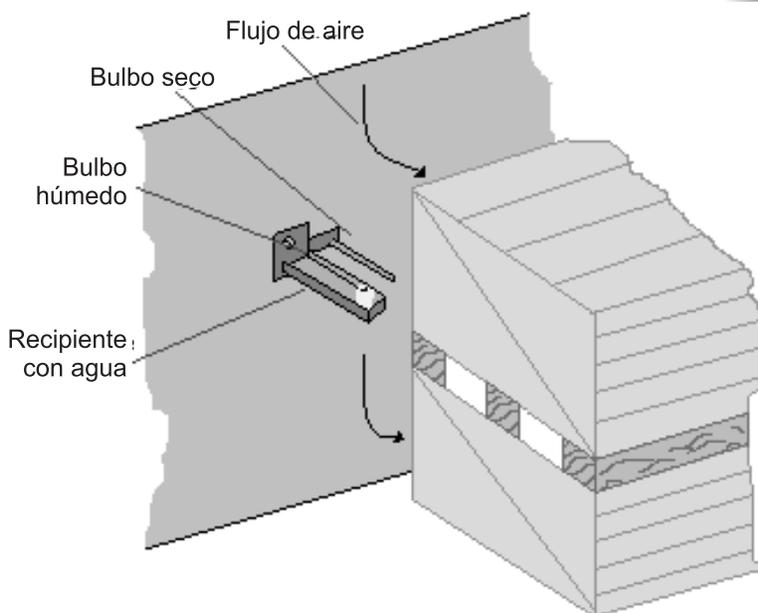


Figura 6.5. Psicrómetro montado horizontalmente y perpendicular a la pared del secadero.

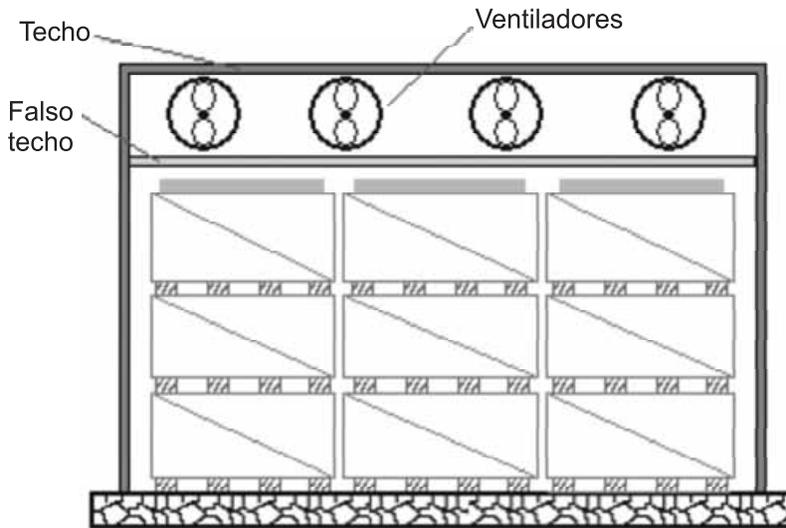


Figura 6.6. Ubicación de los ventiladores dentro de un horno convencional.

5.1.3 Sistema de ventilación

El horno convencional para secado de madera está provisto de ventiladores, ubicados entre el techo y el falso techo (ver figura 7.6), que ayudan a trasportar en el aire la humedad de la madera.

Para cada etapa del proceso se pueden aplicar velocidades del aire que dependen directamente del contenido de humedad en la madera, es así como en etapas donde el contenido de humedad (CH) está por encima del punto de saturación de las fibras (ECH), la velocidad del aire puede estar entre 4 y 7m/s, mientras que para la etapa de igualación y acondicionamiento la velocidad del aire puede disminuir hasta 0.5m/s.

El sistema de ventilación debe proporcionar una velocidad del aire en circulación mayor a 2m/s para poder usar la técnica del psicrómetro y determinar la humedad relativa dentro del secadero. Esta técnica es la más apropiada por la precisión en las medidas y por su práctica implementación y mantenimiento. Cabe mencionar que cuando se alcanza el contenido de humedad deseado (estado anhidro), se inicia el proceso de acondicionamiento en el que la velocidad del aire no es un factor relevante.

La velocidad del aire se debe mantener en el máximo permitido para cada etapa del proceso. La velocidad real dentro del secadero es calculada a partir de la señal entregada por una sonda con aspas tipo molino ubicada

entre la madera o con un anemómetro análogo como los utilizados en minería. Este proceso se realiza en la etapa de instalación para calibrar la velocidad de giro en los motores con las cuales se alcanzan los valores deseados de velocidad del aire en el interior de la cámara. El proceso de calibración se debe realizar de forma regular, dependiendo de la calidad de los ventiladores, para asegurar que la velocidad real del aire se encuentre alrededor de los valores preestablecidos.

El sistema de control actúa sobre los ventiladores aumentando o disminuyendo la velocidad de los motores según sea el caso. De esta manera se asegura un flujo constante y regular del aire dentro del secadero, significando un menor tiempo de secado y menor posibilidad de causar defectos en la madera.

5.1.4 Sistema de humidificación

La madera recién aserrada presenta altos contenidos de humedad llegando incluso a superar el 100%. El proceso de secado debe eliminar estas cantidades de humedad hasta alcanzar los porcentajes de humedad recomendados según el uso de la madera. Es así, como en distintas fases del secado se debe hidratar la madera para regular el gradiente de secado y conseguir un producto de buena calidad en corto tiempo.

Para regular el gradiente de humedad es necesario analizar dos situaciones que se presentan durante el secado de la madera, como son:

- Valores de humedad relativa en el horno por debajo de la recomendada.

Cuando la humedad relativa en el horno, medida por medio del psicrómetro, está por debajo del valor recomendado en el programa de secado para una fase determinada del proceso, es necesario incrementar esta variable dentro del secadero suministrando agua de forma regular sobre las piezas de madera, aspersores ubicados en los pasillos laterales como se muestra en la figura 6.8.

Cuando se acelera de forma exagerada el secado de la madera, se corre el riesgo de establecer condiciones ambientales dentro del horno que deterioran la madera apilada hasta causar su pérdida. La humedad relativa se debe disminuir hasta un porcentaje apropiado, que mantenga homogénea la humedad en el interior de la pieza de madera para evitar tensiones internas. Es decir, mantener el gradiente de humedad adecuado sin causar daños en la pieza.

La hidratación de la madera también se realiza al iniciar el proceso de secado, debido a que la madera pierde humedad, en sus capas exteriores, durante el transporte y apilado. En las etapas de igualación y acondicionamiento también es necesario aplicar pequeñas cantidades de agua sobre la madera para igualar el gradiente de humedad e ir disminuyendo la temperatura interna hasta alcanzar el valor del ambiente. El agua se debe aplicar en la madera de forma homogénea sobre las piezas y a una temperatura similar a la establecida dentro del horno, pues las diferencias de temperatura pueden causar torceduras o colapso en la madera apilada.

- Valores de humedad relativa en el horno por encima de la recomendada.

Los valores de humedad relativa dentro del horno por encima de los recomendados en los programas de secado, representan disminución en la eficiencia del proceso en cuanto al tiempo de secado y su consecuente aumento en los costos. Cuanto mayor sea el gradiente de humedad, más rápido se secará la madera [JUN89]. De esta manera se hace necesario eliminar el exceso de humedad en el ambiente por medio de ventilas ubicadas en la parte superior del horno (ver figura 6.8).

Las ventilas son parte fundamental en un horno convencional para secado de madera, pues permiten el ingreso de aire fresco y la salida del aire cargado con la humedad liberada por las piezas de madera. En los hornos convencionales, no automatizados, las ventilas son operadas de forma manual en intervalos de tiempo determinados de forma instintiva por un operario experimentado.

El control automático de las ventilas se realiza por medio de un motor paso a paso que, mediante un sistema mecánico, abre o cierra las ventilas tipo mariposa dispuestas a lo largo del secadero. La humedad relativa para cada etapa del proceso, como las demás variables físicas determinantes en el secado, se fija de acuerdo al contenido de humedad en la madera.

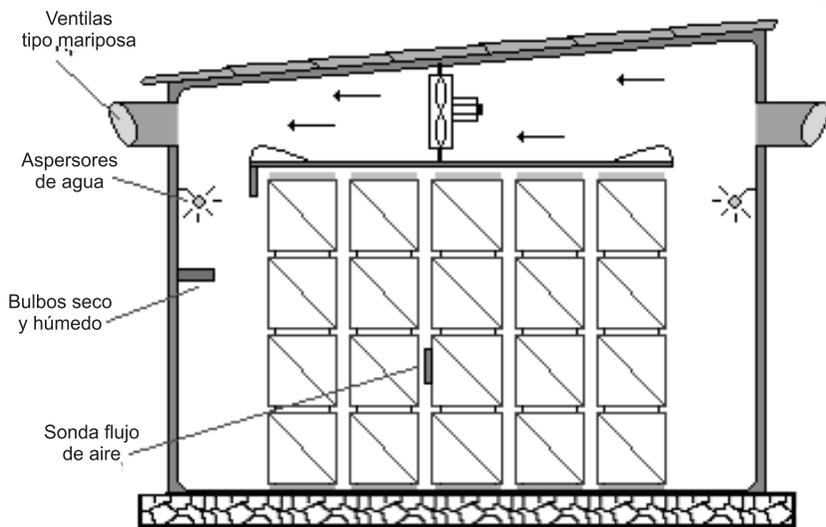


Figura 6.8. Ubicación de aspersores, termómetros y sonda para determinar flujo del aire dentro del secadero.

5.1.5 Sistema de control

Para conducir el secado de madera de tal forma que las piezas sufran los menores daños posibles, es necesario controlar las variables críticas del proceso como son:

- Temperatura
- Humedad relativa
- Velocidad del aire

La manera de conducir el secado es estableciendo las condiciones climáticas dentro del horno de acuerdo a los parámetros establecidos en un programa de secado. Para aplicar los programas de secado se debe determinar el contenido de humedad de las piezas de madera apilada; conociéndose el contenido de humedad (CH) se establece la temperatura, humedad relativa y velocidad del viento sugeridas en los programas según la fase del secado.

Para el proceso de automatización se utilizarán los Programas de Secado de Junta de Acuerdo de Cartagena (JUNAC), que son el resultado del estudio sobre el comportamiento al secado artificial de 105 especies de madera de la Subregión. Estos programas son adaptaciones o modificaciones de los programas de secado para madera comerciales elaborados por el FPRL de Princesa Risborough-Inglaterra.

Los programas de secado establecen las condiciones de temperatura del bulbo seco y del bulbo húmedo para diferentes porcentajes de contenido de humedad, lo que ratifica, a nivel internacional, que la técnica del psicrómetro es la más adecuada para determinar la humedad relativa en un horno para secado de madera.

El sistema de control debe recibir las señales provenientes del horno y compararlas con los valores de referencia correspondientes a cada etapa del proceso de secado. Al establecer las diferencias o similitudes entre las señales reales y las deseadas, el sistema de control debe entregar las señales indicadas para generar, mediante los actuadores, las condiciones climáticas adecuadas dentro del secadero. Las variables que establecen el clima dentro del horno, están determinadas por el contenido de humedad en la madera como se muestra en la figura 6.7, donde se muestra un diagrama general del proceso de control del proceso de secado. Esta característica física de la madera, es medida por medio de electrodos por los cuales se hace circular una corriente DC, la señal entregada es acondicionada y llevada al controlador que contiene el algoritmo para calcular el CH en la madera.

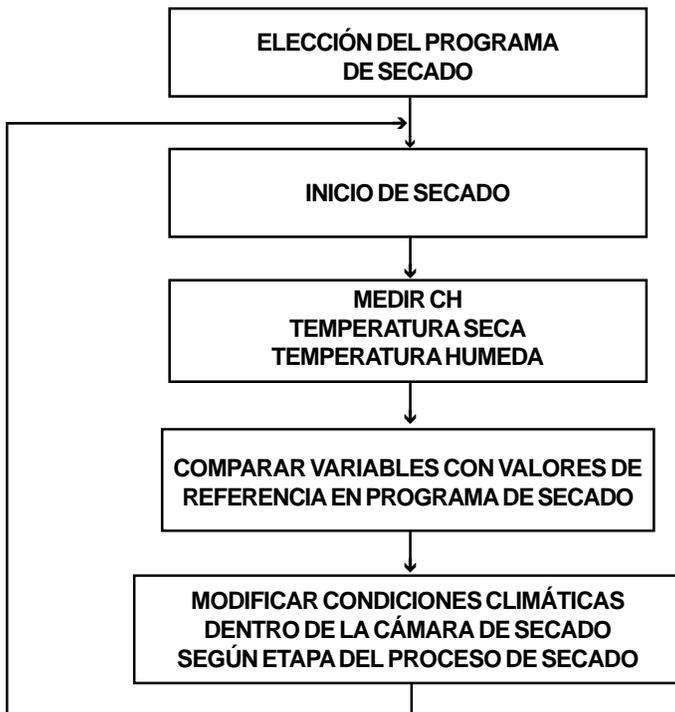


Figura 6.7. Diagrama general de control del proceso de secado.

5.1.5.1 Control de temperatura

En el proceso de secado la temperatura determina que tan rápido se libera la humedad de la madera, es así como ésta se debe mantener en el máximo valor posible para obtener rápidamente piezas de madera secas y sin defectos de acuerdo a los límites establecidos para cada especie de madera. La temperatura dentro del horno es medida por medio de un sensor ubicado en la pared del pasillo lateral por el cual entra el aire a las pilas de madera. Este sensor entrega una señal que es acondicionada para poder entregarla al controlador, el cual contiene una tabla con los valores de temperatura correspondientes a cada nivel de señal proveniente del sensor. El controlador debe determinar, ante una señal de entrada, que acción debe realizar, sea activar el sistema de calefacción por medio de una electroválvula y un encendedor eléctrico, o por el contrario desactivar dicho sistema. En la figura 6.9 se muestra el diagrama para control de temperatura mediante un sistema en lazo cerrado, indicado para mantener de forma regular, la temperatura deseada dentro del secadero. Los actuadores son del tipo ON/OFF (encendido/apagado), por lo que el control será del mismo tipo en lazo cerrado. Este tipo de control permite mantener la temperatura regulando el paso de gas, cabe anotar que este tipo de actuadores se activan con la señal de alimentación y no permiten el flujo de gas de forma proporcional a la temperatura dentro del secadero. La realimentación permite ajustar permanentemente la temperatura con un rango de tolerancia, para este caso, de 2°C.



Figura 6.9. Sistema de control de temperatura ON/OFF en lazo cerrado. La señal de entrada corresponde a la temperatura indicada en el programa de secado

5.1.5.2 Control de humedad relativa

El contenido de humedad en la madera es medido por medio de electrodos ubicados en varias piezas de madera distribuidas de forma representativa dentro de la carga en el secadero. De esta manera la lectura obtenida es apropiada para determinar, por medio de los programas de secado, las condiciones climáticas idóneas para cada etapa del proceso. La humedad relativa influye o afecta de forma directa la humedad de la madera;

si la humedad relativa del aire aumenta, entonces aumenta la humedad de la madera. El aire caliente puede absorber o transportar mayor cantidad de agua de la madera que el aire frío, pues requiere una mayor cantidad de agua para saturarse.

Existen varias posibilidades para acelerar el proceso de secado:

- Disminuyendo la humedad relativa del aire, dejando constante la temperatura.
- Aumentando la temperatura, manteniendo constante la humedad relativa del aire. Esta situación es difícil de manejar debido a que el aumento en la temperatura causa sobre tensiones internas en las piezas de madera y, por otra parte, representa un mayor costo pues para mantener la humedad relativa las ventilas deben permanecer abiertas.
- Combinando la disminución de la humedad relativa del aire con un aumento en la temperatura. Este es el método más común en el secado en cámaras.

El controlador debe establecer la temperatura y humedad relativa del aire de acuerdo al contenido de humedad leído, es así como para aumentar la humedad relativa debe accionar el sistema de humidificación que consiste en un sistema de riego con nebulizadores de alto rocío. Los nebulizadores aseguran una hidratación homogénea de las piezas de madera (ver figura 6.15).

El psicrómetro utiliza la diferencia entre las temperaturas del bulbo seco y el bulbo húmedo para determinar la humedad relativa en la cámara de secado, cuando la humedad relativa del aire está por encima de la humedad relativa sugerida en el programa de secado, el controlador, del tipo ON/OFF, debe abrir las ventilas por un periodo de tiempo que oscila entre 3 y 6 minutos. Así, se logra liberar el aire húmedo reemplazándolo por aire fresco. El control de la humedad relativa dentro de un secadero debe presentar una desviación máxima de 2% de humedad.

6.1.5.3 Control de velocidad del aire

La ventilación o circulación del aire a través de una pila de madera es una condición necesaria para asegurar la remoción de la humedad en las piezas de madera. Cada etapa del proceso permite mantener una velocidad del aire límite para asegurar un desarrollo acelerado del proceso sin causar daños en la madera.

Si se cuenta con un sensor para determinar la velocidad del aire, el controlador debe leer la señal entregada por éste, para determinar, mediante la

función de transferencia del sistema, la señal de salida que impulsará los motores de los ventiladores a la velocidad determinada para cada etapa del proceso de secado. Un control PID (Proporcional+Integral+Derivativo) minimiza los errores y permite conocer rápidamente la respuesta del sistema ante perturbaciones externas.

Cuando no se cuenta con sistema de control realimentado se debe caracterizar muy bien los ventiladores para obtener, dentro de las pilas de madera, las velocidades máximas permisibles para las etapas de secado, por encima y por debajo del punto de saturación de las fibras, y de acondicionamiento. La caracterización se realiza empleando un anemómetro (digital o análogo). Con este método de control de velocidad del aire, el controlador solo debe entregar una señal que corresponda a la velocidad necesaria de acuerdo al programa de secado aplicado siguiendo el contenido de humedad en las piezas de madera. Esta técnica de control no requiere función de transferencia, solo una caracterización adecuada de los ventiladores con carga en el secadero.

La estrategia de mantenimiento aplicada al horno para secado de madera, debe incluir la lubricación de los ventiladores, así como una calibración programada de las señales correspondientes a las diferentes velocidades empleadas en el proceso de secado.

6. CARACTERIZACIÓN DE SENSORES Y ACTUADORES

6.2.1 Consideraciones Generales

Las condiciones climáticas extremas dentro del secadero, exigen características especiales tanto en sensores como en actuadores. Las elevadas temperaturas y altos niveles de humedad deterioran con facilidad los materiales conductores y algunos aislantes que no están diseñados para operar por encima de la temperatura ambiente (alrededor de 25°C). Por estas razones, los cables para alimentación de los ventiladores, y las sondas para determinar el contenido de humedad en la madera, deben presentar una cubierta resistente a altas temperaturas como es el caso del cable siliconado que soporta grandes corrientes y permite trabajar a tensiones elevadas. Para garantizar la durabilidad de los cables que estén en el interior o en contacto con las paredes del horno, se recomienda forrarlos con una cubierta tipo “spaghetti”, utilizadas en las instalaciones eléctricas de automotores.

Las instalaciones de agua y de gas deben soportar grandes presiones y, para la instalación de gas, elevadas temperaturas (alrededor de 80°C),

por ello las instalaciones se deben construir en tubo metálico galvanizado o tubo de cobre, que permite gran maniobrabilidad soportando las condiciones físicas y mecánicas a las cuales van a estar expuestas. Las uniones o juntas de las instalaciones de gas deben estar selladas con un material especial que soporte altas presiones y que cubra, de forma eficiente, las ranuras y pestañas de uniones, codos y acoples para los quemadores tipo flauta.

6.2.2 Sensores

Durante mucho tiempo el hombre ha empleado diversas técnicas para determinar el valor de variables físicas o mecánicas sin exponer su integridad o simplemente para acelerar un proceso. Por esta razón el uso de sensores y transductores es indispensable en un proceso automático para secado de madera. Las variables físicas que intervienen de forma crítica en el secado artificial de madera son la temperatura, humedad relativa y velocidad del viento; estas a su vez dependen, para cada etapa del proceso, del contenido de humedad en las piezas de madera.

6.2.2.1 Sensores de temperatura

En un horno para secado de madera es necesario un control preciso de la temperatura para evitar grietas, rajaduras o deformaciones causadas por sobrecalentamientos. Las temperaturas por debajo del máximo permitido en cada una de las etapas del proceso, representan un aumento significativo en el tiempo de secado. Mediante variaciones controladas de temperatura, que dependen del contenido de humedad en la madera, se obtienen un producto de excelente calidad sin alterar sus propiedades mecánicas.

Los sensores utilizados para detectar la temperatura real dentro del horno son del tipo resistivos, conocido como RTD (resistance temperature detectors) fabricados con materiales metálicos como el platino o el níquel. Estos dispositivos se basan en la variación normal que experimenta la resistencia de un conductor metálico puro con la temperatura, como resultado del cambio de su resistividad y sus dimensiones.

Debido a la temperatura de trabajo (máximo 80°C) y precisión necesaria, se utilizarán detectores de temperatura RTD, con coeficiente de temperatura positivo (PTC), fabricados en platino, que presentan una sensibilidad, estabilidad y repetibilidad muy altas, con una respuesta lineal entre -250°C hasta +850°C. El sensor utilizado, tipo sonda, recibe el nombre de PT100 y presenta un valor nominal de resistencia (R_0) de 100W a 0°C y a 100°C es de 138.5W.

En el horno para secado de madera se utiliza la técnica del psicrómetro para medir la humedad relativa en el recinto, que consiste en medir la diferencia entre la temperatura en un bulbo seco y bulbo húmedo, para lo cual se requiere implementar dos sensores de temperatura, uno de ellos envuelto con una tela de alta absorción que debe mantenerse en contacto con agua destilada. Este sensor debe estar encapsulado, pues si bien están diseñados para soportar niveles altos de humedad, no permiten el contacto directo con el agua.

El comportamiento de los sensores resistivos PT100 empleados, dentro del rango de temperaturas de operación, se describe a continuación mediante los valores de resistencia de salida para cada temperatura en aumento y en decremento. Los datos se muestran en las tablas 6.1 y 6.2, y el comportamiento está graficado en las figuras 6.10 y 6.11.

6.2.2.2 Sondas para Medir Contenido de Humedad

Durante el proceso de secado es fundamental conocer, de manera permanente, el contenido de humedad real en la carga de madera. Conociéndose esta característica de la madera se puede aplicar un programa de secado estableciendo la temperatura y humedad relativa dentro del secadero, de tal forma que el proceso se lleve a cabo en el menor tiempo posible y sin causar sobretensiones en las piezas.

Las sondas empleadas para determinar el contenido de humedad real de forma constante, durante cada etapa del proceso de secado, están fabricadas en un material metálico y terminan en electrodos tipo aguja aislados en toda su longitud excepto en la punta, como se muestra en la figura 6.12. Esto se hace con el fin de conocer un valor más preciso, pues a través de la sonda se hace circular una corriente DC que viaja por las fibras de la madera húmeda; en la superficie de la pieza de madera se encuentra concentrada el agua libre lo que permite que la corriente circule con mayor facilidad por esta zona, indicando mayor humedad en la pieza y por tanto en la carga de madera.

Cuando la madera está eliminando agua (etapa intermedia del secado), la humedad en la superficie es menor que en el centro de la pieza lo que crea un gradiente de humedad, de esa manera la corriente aplicada por medio de los electrodos se conduce principalmente por el centro e la pieza. Una lectura apropiada que permita conocer el contenido de humedad real en la madera, consiste en promediar dos lecturas en la misma pieza, una realizada en el centro de la pieza y otra a 1/3 de la superficie.

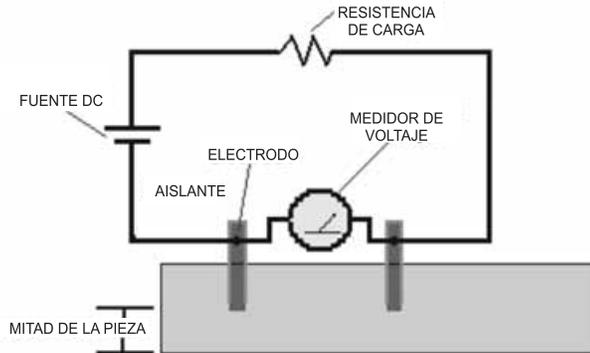


Figura 6.12. Conexión de electrodos para determinar contenido de humedad.

6.2.2.3 Determinación de la Humedad Relativa

Con las sondas diseñadas para medir el contenido de humedad en la madera, se obtiene una variación resistiva que, mediante el acondicionamiento de señal, se transforma en un voltaje diferencial que indica el contenido de humedad en la madera. Esta relación se describe por medio de la siguiente ecuación:

$$CH = 44.17 - 3.3 \log \left(10^7 \frac{0.5 - \frac{V_o}{5}}{0.5 + \frac{V_o}{5}} \right) \quad (6.5)$$

El contenido de humedad determinado mediante la ecuación 6.5, en función del voltaje entregado por las sondas, es el empleado para establecer las condiciones climáticas óptimas para cada etapa del secado de acuerdo al programa de secado. La exactitud de la medida permite, para el rango entre 6 y 25% de humedad, una desviación de $\pm 2\%$, aceptable en todos los casos.

6.2.2.4 Sensor de Contacto

El sensor de contacto actúa como un pulsador normalmente abierto. Al apretar el botón, éste cierra un circuito eléctrico y permite el flujo de corriente a través del sensor. El sistema de control detecta este flujo de corriente y así se entera que el botón ha sido presionado, permitiendo la operación normal del secadero. Al soltar el botón, el circuito se abre y cesa el flujo de corriente, indicando al controlador que la puerta de carga ha sido abierta y este, por seguridad, debe desactivar todos los sistemas y quedar a la espera del cierre correcto de la puerta. Este dispositivo debe ubicarse en el marco de la puerta sin obstruir o limitar el cierre hermético del secadero, de esta manera se asegura el correcto cerrado de la puerta de carga.

Si una persona ingresa al horno en funcionamiento, por un periodo prolongado, puede sufrir problemas respiratorios debido al ambiente seco dentro del secadero.

El sensor de contacto no está expuesto a porcentajes elevados de humedad pero si opera a temperaturas por encima de la temperatura ambiente, por ello debe estar fabricado en un material termo resistente, preferiblemente metálico. Este tipo de sensores son utilizados en sistemas de alarmas en vehículos y viviendas.

6.2.3 Actuadores

En un sistema industrial automático, las variables físicas son medidas por medio de sensores o transductores y modificadas por medio de actuadores, convirtiéndose en elementos finales en un sistema de control. De esta manera, los actuadores son parte fundamental en un proceso de automatización y control. Gracias a los actuadores eléctricos es posible establecer las condiciones climáticas en cada etapa del proceso de secado, de acuerdo al programa de secado.

La temperatura, la humedad relativa y la velocidad del aire son las variables críticas para el secado de madera en un horno de secado convencional. Las características básicas de los actuadores obedecen a las exigentes condiciones climáticas dentro del secadero, es por ello que los dispositivos utilizados para mantener o modificar temperatura, humedad relativa y velocidad del aire, deben estar fabricados en materiales resistentes a altas temperaturas, niveles significativos de presión y porcentajes elevados de humedad, según sea el caso.

6.2.3.1 Electroválvulas

Los dispositivos empleados para permitir el paso de agua en el sistema de humidificación y de gas en el de calefacción, son las electroválvulas. En el mercado se encuentran gran variedad de electroválvulas, su uso depende de la aplicación y características esenciales como presión de trabajo, tipo de fluido y ubicación del dispositivo. En la automatización de un horno convencional para secado de madera se manejan presiones de fluidos relativamente bajas lo que permite el uso de la válvula en ángulo (ver figura 6.14).

Para el sistema de humidificación la presión del agua puede ser mucho menor a la presión entregada en una instalación común de acueducto, pues las boquillas de aspersión utilizadas son de alto rocío y operan a presiones mínimas, bastando para tal fin la presión ejercida por el agua

dentro de 2 metros de tubería de una pulgada dispuesta verticalmente. Bajo esta consideración práctica, la presión de trabajo para los aspersores puede ser la entregada por la instalación común de acueducto. Los aspersores por nebulización de alto rocío son dispositivos fáciles de acoplar a tuberías de cobre que permiten gran maniobrabilidad como se muestra en la figura 6.15.

La presión del gas depende del tipo de quemador y del volumen del secadero. Para el horno en consideración es suficiente con una presión de 7 psi, alcanzando la temperatura de operación dentro del tiempo máximo estipulado por las fábricas de hornos convencionales en países europeos (de 20 a 80°C en aproximadamente 3 horas).

La válvula en ángulo permite obtener un flujo constante, regular sin excesivas turbulencias y es adecuada para disminuir la erosión cuando está es considerable por características del fluido o por la excesiva presión diferencial. El diseño de la válvula es idóneo para trabajar con grandes presiones diferenciales y para fluidos con sólidos en suspensión. En la entrada, la válvula presenta un filtro que reduce al máximo la entrada de impurezas, que ayudado por las características de su diseño, impiden taponamientos en la boquilla de aspersión. En la figura 6.14, se muestra el diagrama de funcionamiento y el aspecto físico de una electroválvula.

La válvula presenta un servomotor eléctrico acoplado al vástago de la válvula, que con el obturador, regula mediante su desplazamiento el paso del fluido.

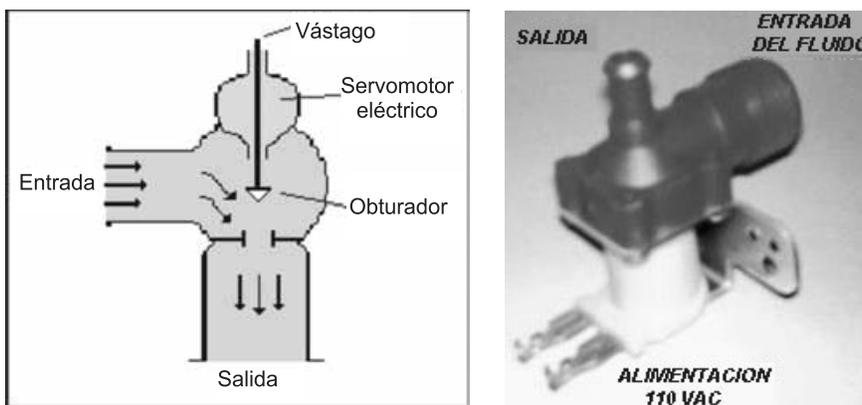


Figura 6.14. Izq. Diagrama básico de una electroválvula. Der. Electroválvula en ángulo para 30Lb de presión.



Figura 6.15. Humidificador por nebulización de alto roció.

6.2.3.2 Encendedores Eléctricos

La forma más segura de encender los quemadores de gas es utilizando un encendedor eléctrico. El encendedor eléctrico es un elevador de corriente que aprovecha cualquier medio conductor para desviar la energía liberada. De esta manera se produce la chispa necesaria para causar ignición en el gas que fluye por los quemadores. En la figura 6.16, se muestra la distancia adecuada a la cual se deben colocar las bujías del quemador.

Para un encendido homogéneamente distribuido se debe ubicar por lo menos una bujía por quemador. La distribución de varias bujías a lo largo del quemador disminuye el efecto explosión que se produce cuando se libera un volumen considerable de combustible antes de causar la ignición. El módulo elevador de corriente puede estar ubicado fuera del horno por lo que no requiere protección contra la humedad o elevadas temperatura.

6.2.3.3 Ventilad

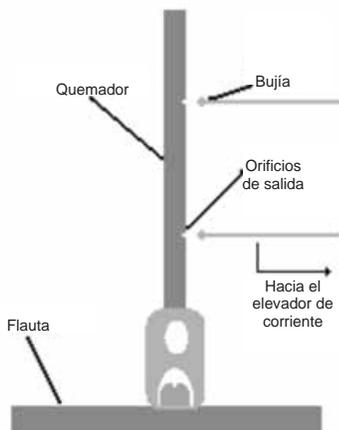


Figura 6.16. Ubicación de las bujías. La distancia entre los orificios de salida en el quemador y las bujías para asegurar que la chispa cause ignición de forma segura es de 1cm

Los ventiladores son impulsados por motores AC que funcionan bajo el principio observado en 1820 por el físico francés André Marie Ampère. Si una corriente pasa a través de un conductor situado en el interior de un campo magnético, éste ejerce una fuerza mecánica sobre el conductor. Los ventiladores deben ser de tipo axial, pues permiten un mayor flujo de aire y facilitan el intercambio de aire húmedo por aire fresco (ver figura 6.17).



Figura 6.17. Ventilador Axial fabricado en aluminio y resistente a porcentajes elevados de humedad. Tomado de YENSUN TECH.

La velocidad de los ventiladores será controlada por un drive para motor de corriente alterna que convierte la potencia AC de la línea de alimentación, en un voltaje AC de magnitud y frecuencia variable. De ésta manera se puede desarrollar el torque total para cualquier velocidad.

Durante el secado de madera la velocidad del aire juega un papel importante en el transporte del exceso de agua, es así como a una mayor velocidad del aire menor será el tiempo de secado. Las velocidades del aire establecidas para las diferentes etapas el proceso de secado, deben estar debidamente ajustadas dentro del secadero con carga; esto se logra con la ayuda de un anemómetro. En la figura 6.18 muestran dos tipos de anemómetro, digital y análogo.



Figura 6.18. Izq. Anemómetro digital. Der. Termoanemómetro digital.

Para el secadero se utiliza el control por frecuencia que es el apropiado cuando se trabaja con motores en jaula de ardilla, a diferencia del control por resistencia o por recuperación de la potencia deslizante, que son técnicas muy útiles cuando se trabaja con motores de inducción con rotor bobinado. Durante la caracterización de los motores se deben registrar las señales de frecuencia necesarias para lograr las velocidades apropiadas en los motores, logrando, como resultado, la velocidad del aire requerida dentro de las pilas de madera. Las señales obtenidas para cada velocidad entregadas por el drive de acuerdo a la señal de salida del controlador.

6.2.3.4 Motores AC

El cierre de las ventilas debe ser hermético para evitar fugas de calor y por tanto pérdidas de combustible. Las ventilas deben contar con un empaque que debe ser reemplazado en cada carga del secadero.

El accionamiento de las ventilas se realiza con la ayuda de un motor AC trabajando a baja velocidad y alimentado con un temporizador. El frenado es ayudado con topes en su eje para evitar sobre tensiones en los brazos de giro de las ventilas Este sistema no significa desgaste para el motor, pues sus devanados ya están desenergizados. Los motores están dispuestos entre el techo y el falso techo con el fin de accionar, con el mismo motor, un par de ventilas, una de entrada y otra de salida de aire. Esto se observa en la figura 6.19, donde también se muestra la ubicación del tope en el sistema de engranaje. La ubicación de los motores que accionan las ventilas no debe obstaculizar el correcto funcionamiento de los ventiladores, por tanto deben estar ubicados junto a estos sobre la misma línea horizontal, con esto se logra que las ventilas se encuentren prácticamen-

te frente a los ventiladores facilitando el intercambio de aire húmedo por aire fresco.

Es importante que el motor trabaje a una velocidad baja sin alterar el torque, pues se requiere de una tensión considerable para accionar las ventilas mediante los brazos, que por ser fabricados en aluminio, no representan un peso excesivo. La velocidad reducida en el motor permite controlar de manera eficiente el ángulo de apertura de las ventilas, que debe ser de 90°, también permite ajustar de herméticamente las ventilas evitando fugas de calor.

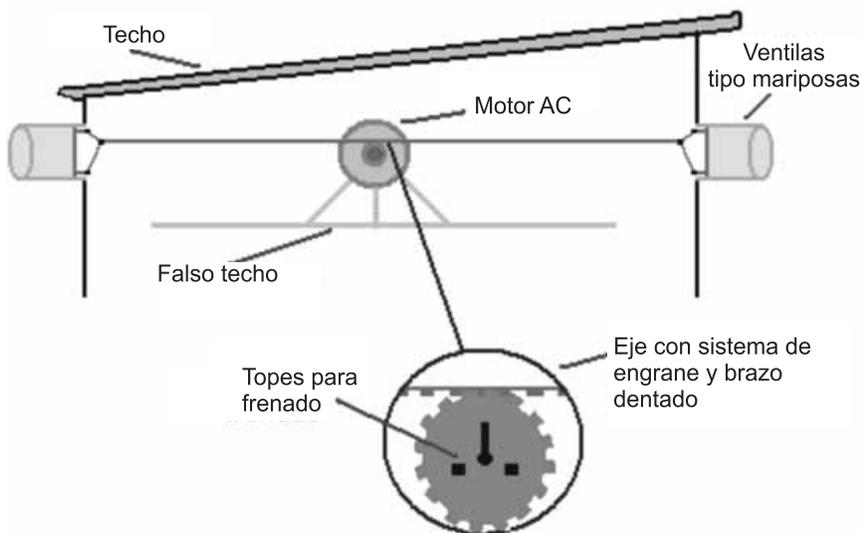


Figura 6.19. Ubicación del motor AC para accionar ventilas. Nótese el uso de topes para disminuir la tensión en los brazos de las ventilas.

6.3 ACONDICIONAMIENTO DE SEÑAL

Para controlar de manera efectiva las variables críticas del proceso de secado, se requiere acondicionar la señal entregada por los diferentes sensores, esto con el fin de procesar la información y actuar sobre los dispositivos finales como son electroválvulas y motores.

El módulo de control presenta entradas análogas, para sensores de temperatura y sondas para medir en contenido de humedad, y digitales para los sistemas de seguridad y configuración por parte del operario. Las salidas deben ser digitales para accionar, mediante un circuito de potencia, los actuadores. Para los ventiladores se necesitan trabajar diferentes velocidades para lo cual se debe incluir un conversor digital-análogo (DAC).

6.3.1 Señales de entrada

6.3.1.1 Sensores de Temperatura

Las funciones del acondicionador de señal, para los sensores de temperatura son:

- Conversión de resistencia a voltaje
- Amplificación
- Aislamiento

Como el sensor presenta variaciones de resistencia a su salida, esta debe convertirse en un voltaje útil que pueda ser leído o amplificado para llegar al sistema de adquisición de datos. Para convertir la resistencia del sensor PT100 se emplea un puente de Wheatstone para medida por deflexión (ver figura 6.20), utilizado para medir resistencia desconocidas mediante el equilibrio de los brazos del puente, constituidos por cuatro resistencias que forman un circuito cerrado, siendo una de ellas la resistencia bajo medida. Este circuito permite obtener un voltaje debido a un cambio en la resistencia del sensor. Para calibrar el puente es necesario variar la resistencia de ajuste hasta obtener la temperatura ambiente (25°C) cero voltios a la salida.

La amplificación se realiza para conseguir niveles de voltaje que se acoplen a las entradas análogas del controlador. Esto también mejora la relación señal a ruido (S/N) de la medida y aumenta la sensibilidad y exactitud. La amplificación debe presentar las siguientes características:

- Alta impedancia de entrada
- Alto rechazo de modo común CMRR, superior a 10dB
- Ganancia estable
- Tensión y corriente de desequilibrio (offset) bajos
- Impedancia de salida baja
- Bajos niveles de ruido y distorsión

Las características de impedancia son las que permiten acoplar el nivel de señal del sensor de temperatura a niveles de voltaje requeridos por sistema de adquisición de datos.

Cuando un sistema está aterrizado inadecuadamente se generan problemas de medición y ruido, como también posibles daños en el sistema de adquisición de datos. Para evitar que esto suceda el circuito acondicionador de señal debe presentar buen aislamiento, rechazando el voltaje de modo común y dejando pasar solamente el voltaje diferencial, correspondiente a la medida de temperatura.

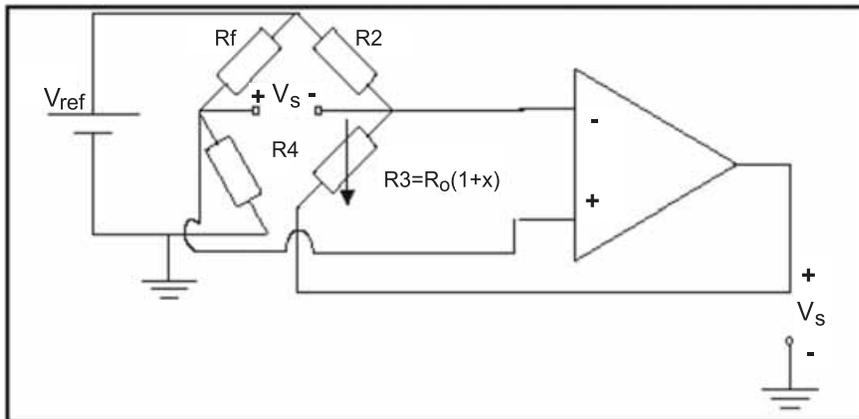


Figura 6.20. Circuito acondicionador de señal. Etapa de conversión de resistencia a voltaje y etapa de amplificación.

6.3.1.2 Sondas para Contenido de Humedad

Los electrodos utilizados para determinar el contenido de humedad en las piezas de madera, y su correspondiente sonda con protección a las altas temperaturas, incluyen un valor de resistencia que debe ser considerado en el momento de caracterizar los electrodos con el fin de obtener una lectura precisa.

Las características resistivas de la madera permiten implementar una etapa de acondicionamiento de señal similar a la empleada para los sensores de temperatura, solo basta variar la sensibilidad del sistema colocando una resistencia en paralelo con los electrodos. Esto se hace con el fin de limitar las variaciones resistivas dentro de un rango establecido, logrando así una salida de voltaje que no sature el amplificador. Por debajo del punto de saturación de las fibras la resistencia eléctrica de la madera tiene un comportamiento descrito por una ecuación logarítmica (ver ecuación 1.2), este mismo comportamiento se puede expresar en función del voltaje de salida en las sondas con los electrodos insertados en las piezas de madera (ver ecuación 6.5). El controlador debe incluir el algoritmo que calcule, a partir del voltaje de entrada, el contenido de humedad real en la carga de madera promediando los valores encontrados en las distintas muestras y considerando las más críticas para la etapa de igualación y acondicionamiento. En la figura 6.21 se muestra el diagrama general para el circuito acondicionador de señal para los electrodos utilizados para determinar el contenido de humedad en la madera.

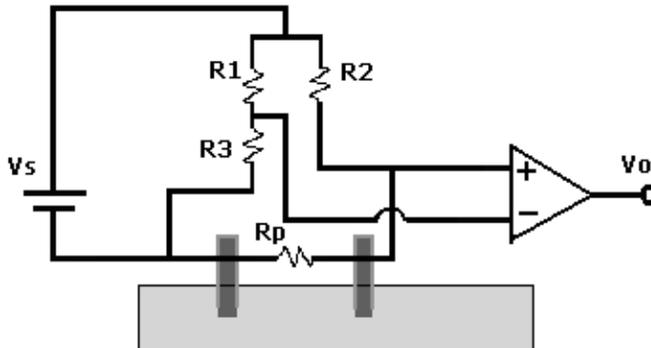


Figura 6.21. Diagrama general para acondicionamiento de la señal entregada por los electrodos. R1,R2 y R3 conforman junto a la resistencia de la madera (en paralelo con Rp para aumentar sensibilidad) el puente de Wheatstone.

6.3.1.3 Entradas de Configuración o Interfaz con el Operario

Un horno para secado de madera debe incluir una serie de entradas al sistema de control, que permita al operario elegir, iniciar y detener un programa de secado. Las posibles variaciones que se deban realizar a los programas de secado, son fruto de la práctica y deben realizarse de forma directa en el programa de control, alterando los valores establecidos de las variables críticas del proceso. Esta labor debe realizarla el programador con base en los datos suministrados por el operario experimentado.

Las entradas de configuración deben permitir las siguientes acciones:

- Elegir tipo de madera.
- Iniciar o detener el proceso de secado.
- Reiniciar el proceso (cuando se requiere hacer alguna reparación o el proceso se ve interrumpido por factores externos).

La forma más simple de informar al controlador la tarea deseada, es mediante entradas digitales debidamente organizadas en el programa de control. Es decir, leyendo el puerto del controlador al que han sido conectadas las entradas de configuración y caracterizando cada palabra según la acción deseada. Estas entradas consisten en pequeños pulsadores, que junto a un arreglo de resistencias, emiten una señal digital en estado alto o bajo (unos y ceros), según sea el caso. La configuración del circuito se muestra en la figura 6.22.

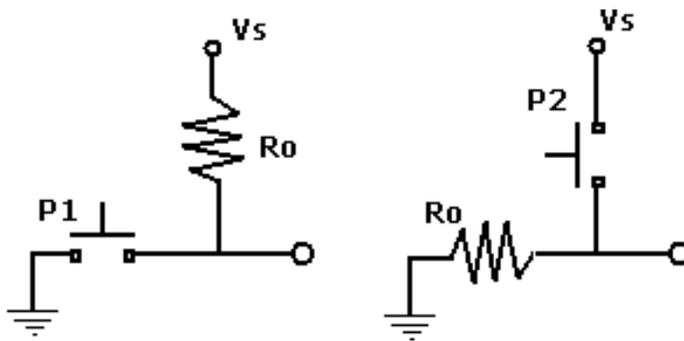


Figura 6.22. Izq. Circuito utilizado para pasar de estado bajo a alto (Flanco de subida). Der. Circuito utilizado para pasar de estado alto a bajo (Flanco de bajada).

6.3.2 Señales de Salida

6.3.2.1 Electroválvulas y Encendedor Eléctrico

Las tensiones y corrientes de operación de electroválvulas y del encendedor eléctrico, no es posible suministrarlas de forma directa con el controlador, excepto cuando se trata de un PLC. Para la automatización de un horno convencional para secado de madera se utiliza un microcontrolador como elemento de control, debido a las pocas señales de entrada y salida que se manejan y la posibilidad que ofrecen estos dispositivos de comunicación serial para control remoto del secadero.

Para accionar las electroválvulas y permitir el flujo de agua o combustible (gas), se requiere de un voltaje de 120VAC y una corriente de 100mA. Una manera de accionar este actuador protegiendo las salidas del controlador, es usando un acoplador óptico a la salida, de esta forma se aísla, eléctricamente, el controlador de la electroválvula. Una medida extra de seguridad, consiste en el uso de un relé de estado sólido debido al continuo cambio de estado en la alimentación de las electroválvulas. Con este dispositivo se logra prolongar la vida útil del acoplador óptico, pues un relé común está diseñado para soportar cerca de un millón de cambios de estado en sus contactos. La configuración típica para el acondicionamiento de señal en electroválvulas y encendedor eléctrico se muestra en la figura 6.23.

La señal del controlador que se encarga de accionar el encendedor eléctrico, es un pulso temporizado con el fin de asegurar la ignición del gas debido a la chispa producida por el levador de corriente. El encendedor eléctrico produce una chispa cada medio segundo por lo que es conveniente que el pulso generado por el controlador, dure entre 2 y 3 segundos.

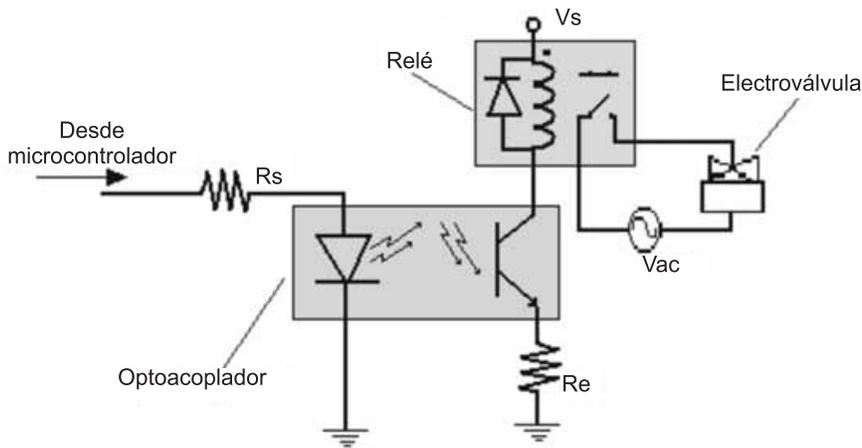


Figura 6.23. Acondicionamiento de señal a la salida del controlador para accionar electroválvulas y encendedor eléctrico. En la figura la electroválvula está alimentada por medio del contacto N.O. (Normalmente Abierto) del relé.

6.3.2.2 Ventiladores y Motores AC

El sistema de ventilación es uno de los más importantes en la automatización de un horno convencional para secado de madera pues la velocidad del aire incide sobre la velocidad del secado de la madera. El controlador debe proporcionar la máxima velocidad el aire permisible para cada etapa del proceso de secado, es así como una de las salidas principales del controlador corresponde al control de velocidad para los motores que impulsan los ventiladores. La velocidad de giro en los motores que accionan las ventilas tipo mariposa, es regulada con el mismo sistema empleado para los ventiladores; considerando que para las ventilas la señal es temporizada de acuerdo a la caracterización de los motores impulsores y su velocidad de giro reducida.

Los *drives* para motores AC utilizan el control de frecuencia para variar la velocidad en motores de inducción con jaula de ardilla. En este caso, la potencia AC de entrada se rectifica, se convierte en un voltaje DC variable mediante un *chopper* y se aplica a un inversor. En la figura 6.24 se muestra la estructura de un drive AC basado e el control por frecuencia. La magnitud y la frecuencia AC de salida de este último se controla utilizando la técnica de modulación de ancho de pulso. Para evitar que se produzca saturación magnética, el motor debe trabajarse con una relación v/f (voltaje/frecuencia) constante. Esta relación es alta para bajas velocidades, y baja para altas velocidades.

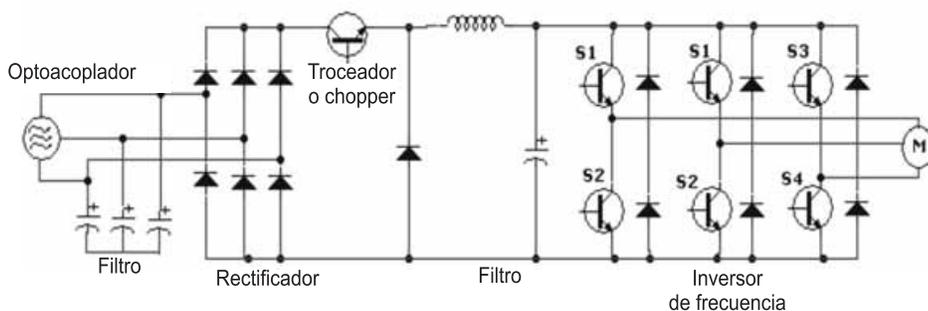


Figura 6.24. Estructura de un drive AC por control de frecuencia.
Tomado de Electrónica Industrial y Automatización.

6.4 Módulo de Control

Al ingresar a la cámara una carga de madera para ser secada, se debe elegir el programa de secado con base a las características de densidad y porosidad del tipo de madera. Debido a esto, los programas de secado de JUNAC, utilizados para el secado al horno, se encuentran clasificados en fuerte, moderado y suave. El operario debe elegir, en el módulo de control, el tipo de programa en el cual clasifica la especie de madera a secar.

El módulo de control es la unión del controlador con el sistema de visualización y los circuitos para acondicionamiento de las señales de configuración o interfaz con el usuario. En la figura 6.25 se muestra un diagrama del controlador con las diferentes entradas y salidas incluyendo la visualización.

La visualización es un aspecto fundamental en desarrollo de secado, pues permite al operario llevar un registro del proceso e indica cualquier situación que pueda ocasionar daños en el secadero o en la carga de madera. Las variables del proceso que deben ser visualizadas de forma permanente son:

- Contenido de Humedad (CH)
- Humedad Relativa
- Temperatura (Bulbo seco)
- Tiempo de Secado
- Detención del proceso por disparo de alarma (debe indicar que tipo de alarma). Las situaciones de emergencia son descritas en la tabla 6.4.

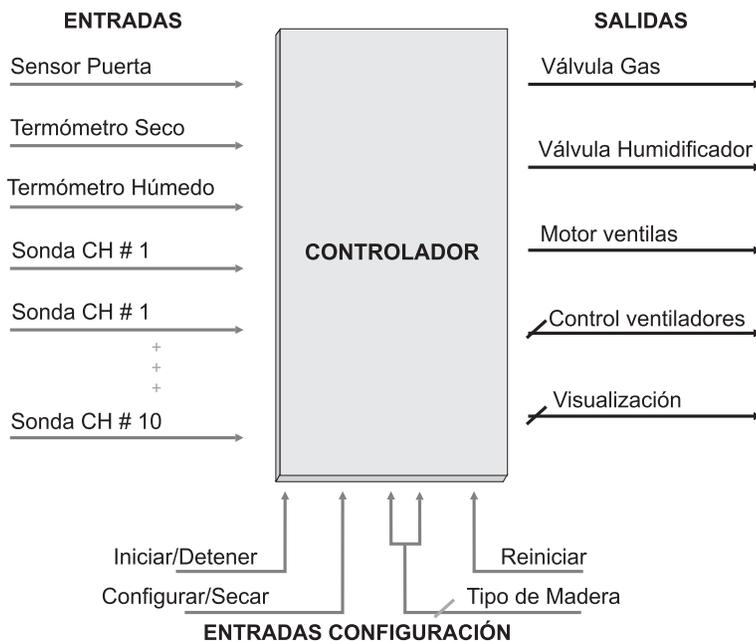


Figura 6.25. Relación de entradas y salidas del controlador.

6.4.1 Secuencia de Control

La conducción del secado de la madera se realiza aplicando los programas de secado JUNAC, donde las condiciones climáticas dentro de la cámara se establecen de acuerdo al contenido de humedad en la madera. El buen resultado del proceso de secado en la madera depende en gran medida del control de temperatura, humedad relativa y velocidad del aire dentro del secadero.

El módulo de control debe registrar las condiciones climáticas dentro de la cámara y compararlos con los valores establecidos según el contenido de humedad en la carga de madera. Para determinar el contenido de humedad el controlador debe promediar las lecturas de las distintas sondas, distribuidas convenientemente en diferentes pilas de la carga. Durante todo el proceso de secado se debe visualizar las variables del proceso e implementar un indicador sonoro o luminoso para indicar el disparo de algunas de las alarmas, que se especificará en el medio de visualización utilizado por el módulo de control como es una pantalla de cristal líquido; esta última se usa por permitir la presentación de información de forma más eficiente.

En la figura 6.26 se presenta un diagrama con las consideraciones básicas para la secuencia de control de las condiciones climáticas dentro el secadero. La función **Visualizar** debe incluir las palabras de datos y control correspondientes para indicar la temperatura, humedad relativa, velocidad del aire y entradas de configuración del sistema. El programa principal y las subrutinas incluyen retardos sugeridos (en milisegundos), estos retardos se deben al tiempo de repuesta de los actuadores, con los retardos se garantiza la ejecución de la acción correspondiente. En la tabla 6.3 se muestra la relación de entradas y salidas.

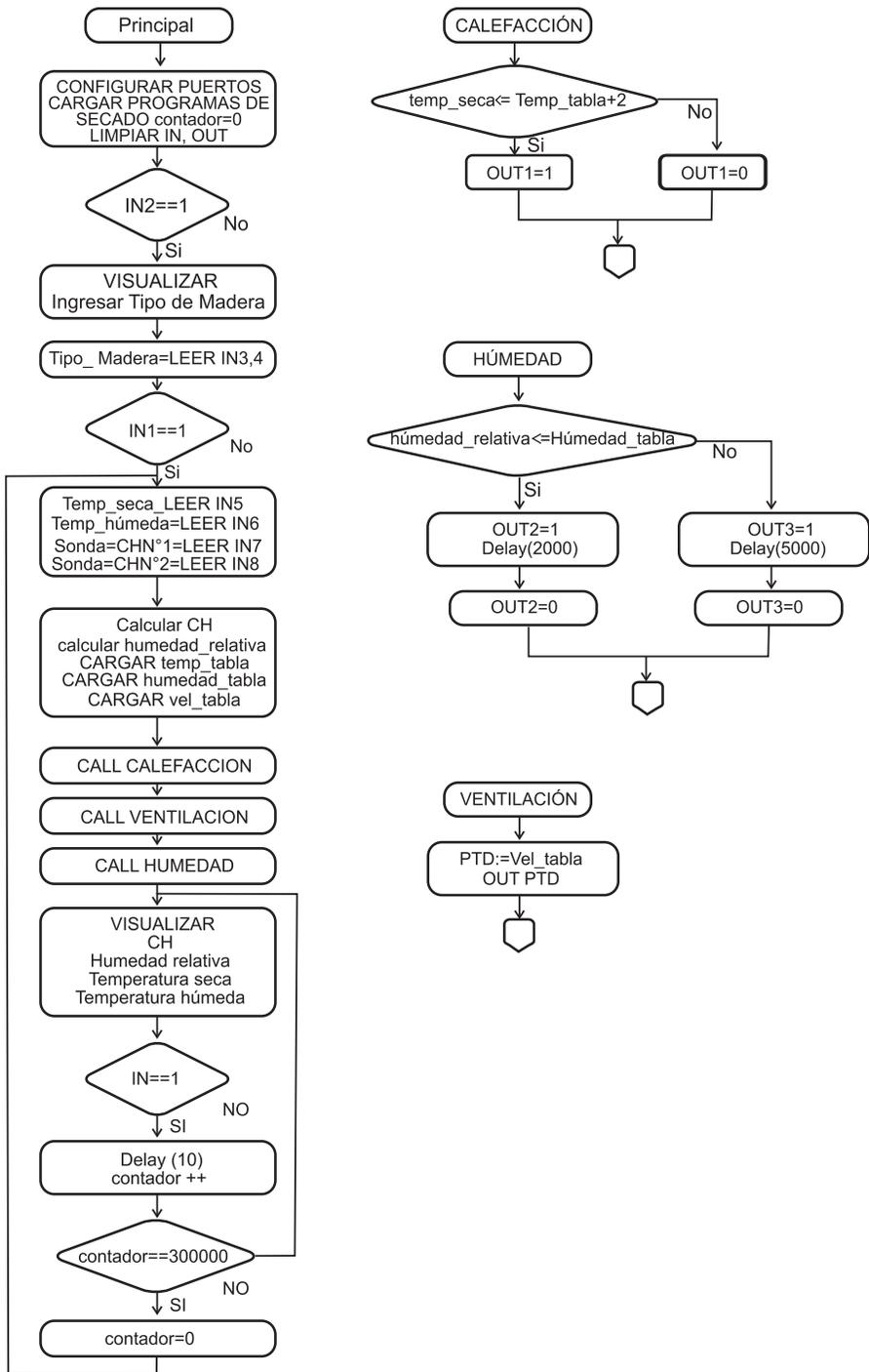


Figura 6.26. Diagrama básico de secuencia de control del proceso de secado de madera en un horno convencional.

ENTRADA	FUNCIÓN	SALIDA	FUNCIÓN
IN1	Interfaz. Iniciar/Detener	OUT1	Paso de gas y encendido eléctrico
IN2	Interfaz. Configurar/Secar	OUT2	Sistema de humidificación
IN3 IN4	Interfaz. Elección del tipo de madera	OUT3 PTD	Accionamiento de ventilas Control de velocidad para ventiladores
IN5	Temperatura Bulbo Seco	-----	Visualizar
IN6	Temperatura Bulbo Húmedo		
IN7	Sonda para determinar el contenido de humedad CH1		
IN8	Sonda para determinar el contenido de humedad CH2		

Tabla 6.3. Función de entradas y salidas del controlador.

En el diagrama de control presentado se incluyen dos sondas para determinar el contenido de humedad, estas pueden llegar a diez en un secadero convencional, obteniéndose una lectura promedio del contenido de humedad más cercana al estado real de la carga de madera. El programa principal realiza la lectura de variables cada 5 minutos con el fin de registrar cambios debidos a las acciones de los actuadores.

Las subrutinas corresponden a los sistemas de calefacción, humidificación y ventilación, donde se realizan acciones sobre los actuadores con el fin de regular las condiciones climáticas dentro del secadero.

6.4.2 Sistema de Alarma y Seguridad

El uso de sustancias combustibles y dispositivos eléctricos que producen chispa, representan un riesgo en cuanto se puede producir una explosión. El uso adecuado del secadero y el mantenimiento programado a encendedores eléctricos y quemadores de gas, minimizan el riesgo de la acumulación del combustible entre el piso y el falso piso, antes de generarse la ignición del combustible. Por otra parte, el ingreso de personas al secadero, cuando se encuentra en funcionamiento, puede causar lesiones respiratorias debidas a elevadas temperaturas y altos porcentajes de humedad.

Para un horno convencional con control automático del proceso de secado de madera, se deben considerar los siguientes eventos y sus posibles medidas de seguridad:

<i>EVENTO</i>	<i>POSIBLE FALLA</i>	<i>MEDIDA DE CORRECCION</i>
Sistema de calefacción encendido pero no se registra aumento en la temperatura de la cámara.	<ul style="list-style-type: none"> ? Bloqueo en el suministro de gas. ? Falta de chispa. ? Daño en sensores de temperatura. ? Válvula manual cerrada. 	<u>Alarma 1</u> En cualquiera de los casos se debe suspender el proceso de secado y el operador debe realizar una inspección general.
Temperatura en aumento por encima de los rangos establecidos.	<ul style="list-style-type: none"> ? Posible incendio dentro de la cámara. ? Falla en válvula de suministro de gas. 	<u>Alarma 2</u> El proceso debe detenerse. Si el operador confirma un incendio se puede activar el sistema de humidificación para evitar la propagación del fuego.
Sensor de contacto indica que la puerta del secadero está abierta.	<ul style="list-style-type: none"> ? Ingreso de personal al secadero. ? Puerta cerrada incorrectamente. 	<u>Alarma 3</u> El secado debe detenerse, pues si hay alguien dentro del secadero puede sufrir lesiones. Si la puerta está abierta se presentan fugas de calor y el secado no es homogéneo.
Nivel de agua bajo en el psicrómetro.	<ul style="list-style-type: none"> ? Falla en el suministro de agua. ? Obstrucción en el ducto que humedece la muselina. 	<u>Alarma 4</u> No es necesario detener el proceso pero debe suministrarse agua al bulbo húmedo para asegurar una lectura precisa de la humedad relativa en el secadero.

Tabla 6.4. Consideraciones generales para posibles fallas en el secadero.

6.4.3 Configuración, Interfaz con el Operario

El operario del horno debe tener experiencia en el secado de madera para poder detectar las posibles fallas en el proceso de secado y realizar las acciones correctivas pertinentes. La configuración del horno para secado de madera, consiste en elegir el programa adecuado de acuerdo al tipo de madera que se encuentre dentro de la cámara de secado. Esta caracteri-

zación de la madera se obtiene siguiendo la tabla 5.3, que corresponde al tipo de programa JUNAC a aplicar para las diversas maderas de la Subregión Andina.

Para algunos usuarios resulta conveniente seguir un programa de secado específico para cada especie de madera, por ello se incluye en el ANEXO II un listado con los programas de secado para maderas comerciales en climas templados y tropicales.

En la figura 6.27 se muestra un ejemplo de interfaz con el usuario, donde por medio de pulsadores, se puede elegir de un listado visualizado en la pantalla, el programa de secado que se va a seguir para secar la carga de madera.

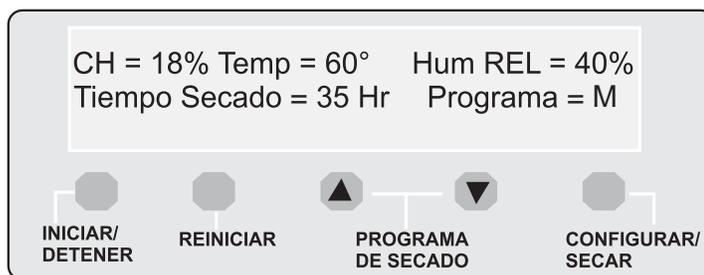


Figura 6.27. Teclado y pantalla correspondientes a la interfaz con el operario de un horno convencional automatizado.

Las alarmas registradas son mostradas en la pantalla y, por medio de un indicador sonoro, el operario podrá enterarse de la situación de emergencia y tomar las medidas correctivas necesarias.

6.4.4 Comunicación Serial

En algunas situaciones, dependiendo de la topografía del terreno o la disponibilidad de un operario, resulta conveniente realizar supervisión y control remoto del proceso de secado. Para éste fin, el módulo de control cuenta con un puerto serial con el cual el operario podrá conocer el estado y desarrollo del proceso de secado. El puerto comunica el controlador a una red de control o directamente con un PC. La implementación del puerto serial conviene por las distancias alcanzadas sin necesidad de regeneradores de señal.

El controlador reconoce un comando enviado de forma serial, para indicar la supervisión remota. Como medida de seguridad se recomienda ingresar un código de seguridad para la configuración del sistema.

6.4.4.1 Software para Supervisión y Control por PC

La comunicación entre el controlador del horno automatizado para secado de madera y un PC, se realiza mediante protocolo RS-232, por tanto el módulo de control incluye un conversor que convierte los niveles de voltaje a la salida del microcontrolador, en los niveles de voltaje usados bajo el protocolo RS-232 (+15v y -15v).

El uso de comandos indicando la función deseada desde el controlador remoto, permite al microcontrolador, en el horno, enviar la información requerida o ejecutar alguna función, con el sincronismo adecuado. La implementación de un código detector y corrector de errores es importante para garantizar la transmisión y recepción de la información deseada. El diagrama de la figura 6.28 indica los pasos a seguir para implementar el algoritmo encargado de la supervisión y control por PC.

La interfaz gráfica es uno de los aspectos fundamentales a desarrollar en el software de control remoto, pues la facilidad para comprender el estado del proceso de secado, por parte del operario, depende de la forma simple y eficaz en que sean presentados los datos. Cuando se presenta una situación de emergencia se activa una función de alarma y, bajo estas circunstancias, la posibilidad de suspender el proceso de secado debe ser de fácil acceso.

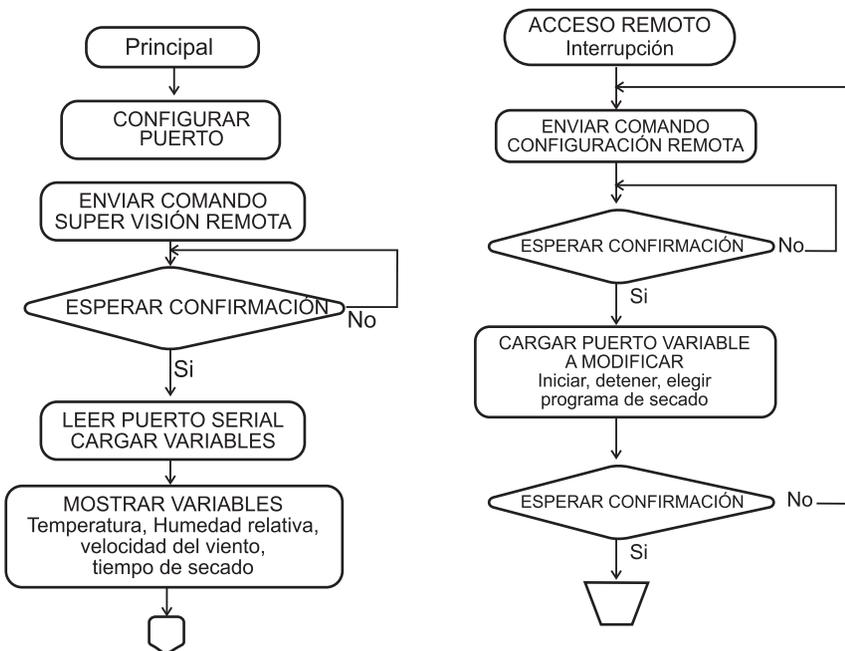


Figura 6.28 Diagrama de flujo con instrucciones para mando remoto.

6.4.4.1 Registro del Desarrollo del Secado

Una de las principales ventajas del control remoto, es la posibilidad de llevar un registro detallado del desarrollo del proceso de secado. Los datos transmitidos desde y hacia el microcontrolador, encargado de regular las condiciones climáticas dentro del secadero, pueden ser tomados y organizados por el PC en un archivo que contenga las especificaciones, como son condiciones climáticas, eventos no deseados, registro de mantenimiento, reporte sobre el rendimiento del secadero y consumo de combustible.

Los archivos creados para cada carga de madera pueden servir para corregir fallas en los datos de referencia contenidos en los programas de secado. Estas correcciones permitirán obtener un mejor producto final disminuyendo los defectos producidos por el secado.

6.5 TRABAJOS FUTUROS

Una de las aplicaciones adicionales que se le pueden dar al horno diseñado, corresponde al secado de guadua. El secado guadua presenta diversos inconvenientes incluyendo las fracturas en el corte y transporte, que se convierten en grietas en la etapa desecado. Por otra parte la guadua es secada por métodos naturales que tardan entre 15 y 25 días.

La forma de conducir el secado de madera se realiza a partir de la medición del contenido de humedad, que es precisamente el aspecto estudiar para aplicaciones con guadua. Los electrodos utilizados para medir el contenido de humedad, no se pueden utilizar en la guadua debido a que sus paredes son muy delgadas (entre 1 y 2cm) y se agrietan con facilidad. Una posible alternativa es implementar un sistema de medida basado en el uso de electrodos superficiales que no necesiten clavarse. A través de los electrodos se puede enviar una señal de alta frecuencia y determinar, a partir de la intensidad de la señal, el contenido de humedad en la guadua.

Si recuenta con un analizador de espectros se puede lograr una caracterización adecuada del sistema, pues la guadua al secarse pierde el color verde que tiene cuando está en pie (ver figura 6.31) y toma un tono amarillo claro.



Figura 6.31. Foto de cultivo de guadua donde se observa la guadua cortada y seca en el mismo cultivo.

6.6 ANÁLISIS DE COSTOS

La selección del sistema y método de secado más apropiado para la aplicación a escala industrial, con lleva un análisis profundo de las implicaciones de orden económico que pueden afectar los intereses de la empresa maderera interesada.

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

- Consumo anual de madera.
- Tipos de productos que se elaboran.
- Fuentes de energía disponibles.
- Maderas utilizadas: especie, espesor y precio.
- Tiempo de secado.
- Rotación del capital.
- Pérdidas de madera durante el secado.
- Mano de obra requerida y salarios.
- Inversión en equipos y materiales.

La condición esencial para obtener un buen secado al horno, es disponer de equipo apropiado, con registradores de calor, buen sistema de ventilación, controles para la humedad relativa del aire (tubería de rocío y ventilas para la entrada y salida del aire) y un controlador apropiado para el proceso.

Los factores que deben tenerse en cuenta para el cálculo de los costos de secado en horno, son los siguientes:

- a. Inversión total, que comprende el costo de la estructura del horno, sistemas de control, instalaciones para suministro gas y agua, sistemas de conducción de energía, transporte al sitio de instalación y montaje _____ **I = (\$)**
- b. Porcentaje anual de depreciación de la inversión. Se estima un periodo de 8 para la depreciación de la secadora _____ **F1=(%/año)**
- c. Volumen de madera a secar por año _____ **Vm = (m³/año)**
- d. Tasa anual de interés _____ **i = (%/año)**
- e. Área requerida para la secadora y apilado de la madera _____ **As=(m²)**
- f. Costo del terreno para la secadora _____ **K1=(\$/m²)**
- g. Costo de obras civiles para instalación de la secadora _____ **K2=(\$/m²)**
- h. Porcentaje anual de depreciación de las obras civiles. Se acostumbra fijar un periodo de 10 años para la depreciación de las obras civiles _____ **F2=(%/año)**
- i. Extracción promedio de humedad por m³ de madera;
- $$W = \frac{CH_i - CH_f}{100} \text{ _____ } \mathbf{W=(Kg \text{ de } \text{agua/m}^3)}$$
- j. Consumo promedio de gas durante un año por Kg de agua extraída _____ **Q=(m³/Kg de agua)**
- k. Precio del combustible (gas) _____ **Pq=(\$/m³)**
- l. Potencia requerida por los ventiladores durante el secado _____ **NW=(Kw)**
- m. Consumo de energía de los ventiladores expresado como un porcentaje de la potencia de los motores _____ **Y=(%)**

- n. Costo de energía _____ **Pe=(\$/Kwh)**
- o. Precio de maderera antes del secado excluyendo el costo del apilado _____ **Pm=(\$/m³)**
- p. Tiempo de almacenamiento de la madera durante el presecado _____ **Tp=(meses)**
- q. Tiempo de secado al horno _____ **Ts=(días)**
- r. Capacidad de la secadora en volumen neto de madera _____ **Vs=(m³)**
- s. Tiempo de apilado (carga) _____ **Ta=(min/m³)**
- t. Tiempo de descargue _____ **Td=(min/m³)**
- u. Costo de la mano de obra; incluyendo prestaciones sociales _____ **L=(\$/hora)**
- v. Porcentaje estimado de las pérdidas de madera durante el secado al horno _____ **Pw=(%)**

El cálculo de de los costos de secado en horno se realiza considerando como unidad de medida el metro cúbico de madera. La rentabilidad se calcula considerando que el precio de la madera seca oscila entre 1.75 veces y el doble del precio recién aserrada o en su estado verde¹.

De esta manera el cálculo de los costos del secado al horno obedece a la suma de los siguientes ítems expresados en \$/m³:

A. Depreciación sobre inversión en la secadora:
$$\frac{I_x - F1}{Vm_x - 100}$$

B. Interés sobre la inversión:
$$\frac{I_x - i}{Vm_x - 100}$$

¹ Dato suministrado por Agencias de Madera locales.

C. Interés sobre el costo del terreno ocupado por la secadora:

$$\frac{As_x_K1_i}{Vm_x_100}$$

D. Depreciación sobre obras civiles:

$$\frac{As_x_K2_x_F2}{Vm_x_100}$$

E. Interés sobre el capital circulante:

$$\frac{Pm_x_Tp_i}{12_x_100}$$

F. Costo del combustible (gas):

$$W_x_Q_x_Pq$$

G. Costo de la energía consumida por los ventiladores:

$$\frac{NW_x_24_Ts_x_Y_x_Pe}{Vs_x_100}$$

H. Costo de mano de obra durante el apilado:

$$\frac{Ta_x_L}{60}$$

I. Costo de mano de obra para el descargue:

$$\frac{Td_x_L}{60}$$

J. Valor de las pérdidas de madera durante el secado al horno:

$$\frac{Pm_x_Pw}{60}$$

Costo Total del Secado al Horno:(Sumatoria de **A** hasta **J**)

Para empresas que requieren del secado de más de 1000m³ / año, se considera antieconómica la utilización del secado al aire libre. De ahí la tendencia a desarrollar sistemas que disminuyan el tiempo de secado para el rango de humedad entre la condición verde y el punto de saturación de las fibras [JUN89]. Otro factor que favorece la utilización de hornos seca-

dores es el alto riesgo económico que representa el almacenamiento al aire de grandes cantidades de madera durante largos periodos de tiempo.

5. CONCLUSIONES

Habiéndose observado y analizado la problemática presentada en las fábricas de muebles y demás empresas cuya materia prima es la madera, se estudio la posibilidad de realizar el diseño de un sistema automatizado para secado de madera. Aplicando los conocimientos en Ingeniería Electrónica fue posible diseñar un sistema de control para regular las condiciones climáticas dentro de un horno convencional para secado de madera..

Los métodos de instrumentación y control utilizados permiten adaptar el sistema para diferentes aplicaciones como son el secado de guadua y el control de secaderos interconectados donde se manejan grandes volúmenes de madera.

Los beneficios del sistema automatizado para secado de madera radican en la durabilidad y eficiencia en cuanto a los valores alcanzados de contenido de humedad (por debajo el 14%). Los materiales empleados en la estructura del horno soportan las condiciones climáticas extremas dentro de la cámara. Por otra parte, los dispositivos de control presentan características que permiten su ubicación dentro de la cámara sin representar limitación u obstrucción en el proceso de carga y descarga.

La implementación de un secadero automatizado, brinda resultados favorables a las empresas que utilizan la madera como materia prima. La rentabilidad del sistema de secado al horno, radica en la valorización de la materia prima seca que se encuentra alrededor del 80% con respecto a su precio en estado verde. La reducción de tiempo de secado permite a los empresarios de la región manejar mayores volúmenes de materia prima. Con esto se genera desarrollo en la región fortaleciendo al departamento del Quindío como uno de los principales productores de madera aserrada, muebles de exportación y productos artesanales de excelente calidad.

BIBLIOGRAFIA

- BARGHOORN, A. R. Tecnología de Madera. Universidad Nacional Francisco José de Caldas. Bogotá Colombia. 2001.
- CEKIT S.A., Electrónica Industrial y Automatización. 2000.
- CREUS, Antonio. Instrumentación Industrial. 6ª Edición. 2001.
- DAVIDSON, R. W. The effect of temperature on the electrical resistance of wood. Prod J. New York. 1958.
- ENCARTA 2005. Biblioteca de Consulta. Microsoft Corporation.
- HILDEBRAND. Die Schnittholz Trocknung 5. Auflage, Ronnenberg/ Hannover. República Federal Alemana. 1987.
- CENTA. ICA. División de Capacitación y Asesoría Agropecuaria. Tibaitatá. A.A. 151123 Santafé de Bogotá, Colombia. 2002.
- JUNAC Junta de Acuerdo de Cartagena, Manual del Grupo Andino Para el Secado de Maderas, Proyecto Subregional de Promoción Industrial de la Madera para Construcción, Ed. Carvajal S.A., 1989.
- KOLLMAN, F. F. P. Y W. A Coté. Principles of wood science and technology - solid wood I. Springer - Verlag, New York. 1968.
- MEDRANO, S. Procedimiento MA-TEM04-04/03: Calibración de higrómetros en higróstatos de sales saturadas & Calibración de generadores de humedad. MetAs, Metrólogos Asociados. Cd. Guzmán, Jalisco, México. 2003.
- RASMUSSEN, E.F. Manual del Operador del Horno de Secado. Lab. Prod. Forestales. Manual de Agricultura N° 188, Washington.. 1960.
- SANCHES, Epifanio. Enciclopedia de la Construcción, Tomo 20, Aislamiento Térmico y Acústico. 1991.
- SIAU, Jhon F. State University of the New York. College of Environmental Science and Forestry. 1984.
- SILVERIO Viscarra, GUIA PARA EL SECADO DE MADERA EN HORNOS, Proyecto de Manejo Forestal Sostenible BOLFOR
- SKAAR, C. Water in wood. Syracuse University Press. New York. 1972.



Afiliada a la Asociación Colombiana de Universidades "ASCUN"

Editorial Universidad La Gran Colombia, Seccional Armenia.

Este libro se imprimió en el Centro de Medios
Audiovisuales, con un tiraje de 100 ejemplares.

La composición tipográfica se realizó
empleando las familias Arial y Futura.

2008