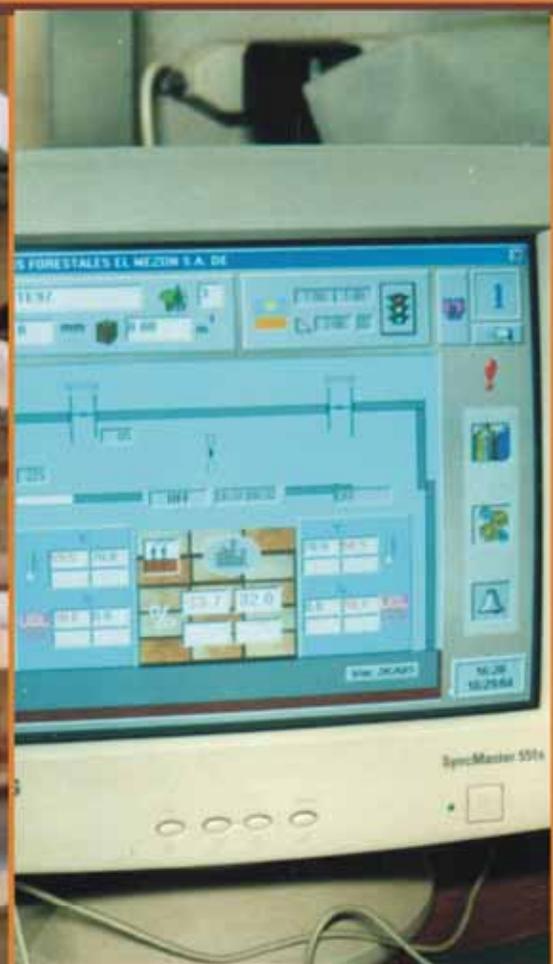


GUÍA

DE TECNOLOGÍA Y PROCEDIMIENTOS PARA EL TRATAMIENTO FITOSANITARIO Y MANEJO DE EMBALAJE DE MADERA UTILIZADO EN EL COMERCIO INTERNACIONAL





SECRETARÍA DE MEDIO
AMBIENTE Y RECURSOS
NATURALES



SUBSECRETARÍA DE FOMENTO Y
NORMATIVIDAD AMBIENTAL

GUÍA

DE TECNOLOGÍA Y PROCEDIMIENTOS PARA EL TRATAMIENTO FITOSANITARIO Y MANEJO DE EMBALAJE DE MADERA UTILIZADO EN EL COMERCIO INTERNACIONAL

MÉXICO, D.F. 2005



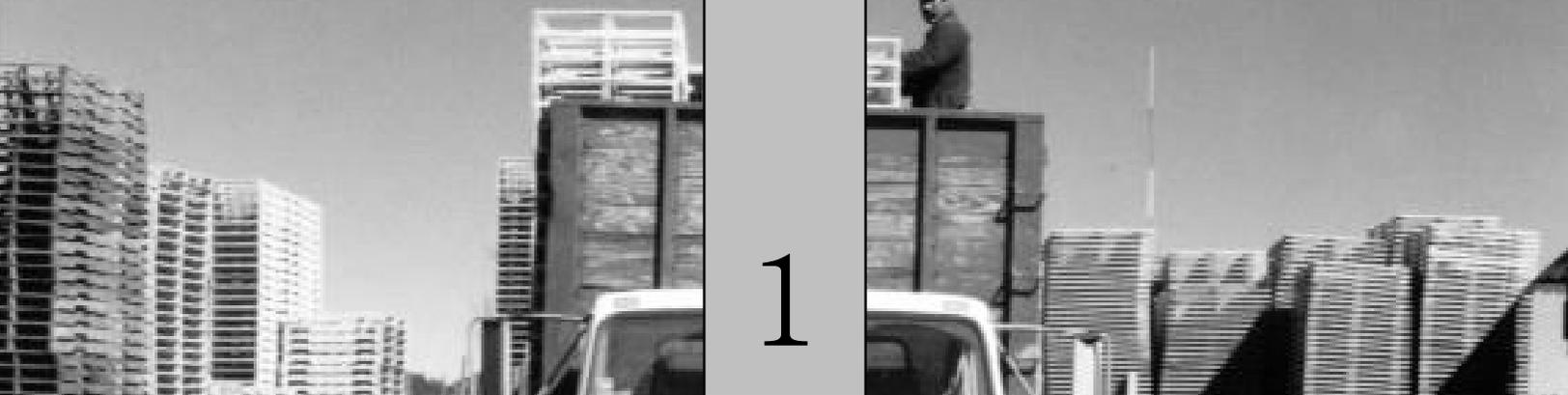
CONTENIDO

1. Marco de referencia	1
2. Justificación para la aplicación del tratamiento fitosanitario	3
3. Normatividad vigente	5
4. Factores a considerar para la aplicación del tratamiento térmico al embalaje de madera.	9
4.1 Aplicación de calor a la madera	9
4.1.1 Calor específico y capacidad térmica de la madera	9
4.1.2 Conductividad térmica en la madera	12
4.1.3 Efecto del calor sobre los hongos en la madera	15
4.1.4 Efecto del calor sobre los insectos en la madera	15
4.1.5 Efecto del calor sobre las propiedades de la madera	16
4.2 Influencia del contenido de humedad (CH) de la madera	18
4.2.1 Contenido de humedad de la madera	18
4.2.2 Contenido de humedad en equilibrio (CHE)	20
4.2.3 Efecto del CH en el desarrollo de hongos	21
4.2.4 Efecto del CH en el desarrollo de los insectos	23
4.2.5 Efecto del CH en la capacidad térmica de la madera	24
4.2.6 Efecto del CH en el tiempo de calentamiento de la madera	25
4.2.7 Efecto del CH sobre las propiedades de la madera	27
4.3 Influencia de la circulación del aire durante el tratamiento térmico	29
4.3.1 Función de la circulación del aire durante el tratamiento	29
4.3.2 Velocidad requerida del aire	29
4.3.3 Caudal requerido del aire	30
5. Sistemas operativos requeridos en la cámara para tratamiento térmico fitosanitario	33
5.1 Sistema de calefacción	33

5.1.1	Demanda de calor para el tratamiento térmico.	33
5.1.2	Tipos de generadores de calor	34
5.1.3	Diseño del sistema de calefacción	37
5.2	Sistema de circulación del aire	38
5.2.1	Velocidad de circulación del aire	38
5.2.2	Tipos de ventiladores	38
5.2.3	Desviadores y plafón	39
5.3	Sistema de humidificación	40
5.4	Sistema de control y registro	41
5.4.1	Controlador – registrador de la cámara	41
5.4.2	Sensor – graficador de la temperatura en la madera	43
5.4.3	Colocación de los sensores en el embalaje	44
5.5	Sistema de carga y descarga	45
5.6	Cámara de tratamiento térmico	47
5.6.1	Requerimientos de espacio interno y externo	47
5.6.2	Sistemas constructivos. Materiales y diseños	48
6.	Programas de aplicación del tratamiento térmico al embalaje de madera.	49
6.1	En cámaras de calefacción directa con quemadores de gas	54
6.2	En cámaras de calefacción indirecta con caldera de vapor, agua caliente o aceite diatérmico y sistemas de humidificación	55
7.	Estimación de costos de cámaras, equipos y proceso de tratamiento térmico	59
7.1	Factores a considerar	59
7.2	Costos de inversión	60
7.3	Costos del tratamiento térmico	61
8.	Tratamiento fitosanitario con bromuro de metilo	67
8.1	Propiedades del bromuro de metilo	67
8.1.1	Propiedades generales	67
8.1.2	Capacidad calórica	68
8.1.3	Límite de inflamabilidad; (bromuro de metilo en aire)	68
8.2	Factores abióticos para las cámaras	68
8.3	Aplicación del bromuro de metilo	71
8.3.1	Concentración por tiempo	71
8.3.2	Cálculo de la dosis	71
8.4	Medidas de Seguridad	72

CONTENIDO

9.	Almacenamiento del embalaje después del tratamiento fitosanitario	75
9.1	Almacenamiento del embalaje después del tratamiento térmico	75
9.2	Almacenamiento del embalaje después del tratamiento con bromuro de metilo	77
10	Glosario	79
11	Bibliografía consultada	83



1

MARCO DE REFERENCIA

Lo establecido en la presente Guía no es de carácter normativo, tiene como único objetivo, el proporcionar algunos elementos técnicos básicos referentes a la aplicación de los tratamientos fitosanitarios que establece la NOM-144-SEMARNAT-2004, para los embalajes de madera que se utilicen en la exportación de bienes y mercancías.

El conocimiento de estos elementos técnicos apoya la toma de decisiones para la instalación de infraestructura para la aplicación de dichos tratamientos fitosanitarios y ayuda a lograr mayor eficiencia y menores costos.

Los embalajes de madera son esenciales en el comercio internacional para el movimiento y protección de bienes y mercancías, sin embargo, son comúnmente fabricados con madera de calidad limitada que carece de un procesamiento o tratamiento suficiente para eliminar las plagas vivas presentes en la madera en rollo o recién cortada.

Como consecuencia, se han realizado, en los diversos puntos de ingreso de bienes o mercancías de importación, intercepciones de plagas no nativas de importancia cuarentenaria presentes en el embalaje de madera, las cuales son capaces de sobrevivir, introducirse y dispersarse en cualquier parte del mundo, por lo que el embalaje de madera es considerado una de las principales vías en el movimiento de plagas no nativas de cuarentena.

Para la atención de la situación de riesgo fitosanitario, la Convención Internacional de Prevención Fitosanitaria (IPPC) de la FAO adoptó la Norma Internacional de Medidas Fitosanitarias No. 15 (NIMF N°. 15) para el embalaje de madera denominada "Directrices para Reglamentar el Embalaje de Madera Utilizado en el Comercio Internacional".

La NIMF N° 15 describe las medidas fitosanitarias para reducir el riesgo de introducción y diseminación de plagas cuarentenarias asociadas al embalaje de

madera, fabricado con madera en bruto de coníferas y latifoliadas, utilizado en el comercio internacional, incluyendo una Marca reconocida internacionalmente.

Para dar cumplimiento a este compromiso internacional, México a través de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), publicó en el Diario Oficial de la Federación (DOF) la *Norma Oficial Mexicana NOM-144-SEMARNAT-2004, Que establece las medidas fitosanitarias reconocidas internacionalmente para el embalaje de madera, que se utiliza en el comercio internacional de bienes y mercancías.*

Por otro lado, como el embalaje de madera no había estado sujeto a una regulación específica para asegurar su sanidad y ahora la normatividad actual requiere que los fabricantes de embalaje adapten sus procesos de fabricación para poder aplicar alguno de los tratamientos fitosanitarios establecidos en la norma NOM-144, la SEMARNAT, como ha sido su política, consideró conveniente sistematizar la información de tecnología y procedimientos que apoye a los particulares en la toma de decisiones para realizar inversiones e incrementar su eficiencia en procedimientos para la aplicación de tratamientos fitosanitarios.

Lo anterior considera que entre los fabricantes de embalajes existe una amplia variedad de situaciones de conocimiento e infraestructura disponible para la aplicación de tratamientos fitosanitarios. Se tienen empresas que solo arman el embalaje, no tienen mayor conocimiento de procesos más complejos y se tienen casos de empresas que disponen de infraestructura y personal especializado para el tratamiento de la madera.

JUSTIFICACIÓN PARA LA APLICACIÓN DEL TRATAMIENTO FITOSANITARIO

En las dos últimas décadas el comercio internacional de bienes y servicios ha crecido lo que en varias décadas anteriores no lo hizo, con una expansión que abarca casi la totalidad de los países del mundo. Sin embargo, conforme la economía global crece, los riesgos de importar plagas también crece para todos los países, dado que el traslado de productos y mercancías a nivel internacional representa el principal medio de propagación de organismos patógenos, mismos que pueden establecerse en un nuevo ecosistema ocasionando disturbios o alteraciones con consecuencias ecológicas y económicas negativas.

Muchos organismos que se han establecido en un nuevo hábitat han logrado desarrollarse a grados de polución y desafortunadamente han reemplazado flora y fauna nativas, ocasionando pérdida de la biodiversidad y del ecosistema mismo, algo que nunca podrá recuperarse.

En este comercio internacional siempre creciente los embalajes de madera son literalmente los productos que soportan la economía global, pues son esenciales en el transporte, distribución y almacenaje de la mayoría de los productos industriales y de consumo. Ahora bien, se considera que del 70% al 90% de los embalajes son fabricados de madera o de productos a base de madera, representando elevados volúmenes; por citar un ejemplo, en los Estados Unidos de Norteamérica, en el año 2000, se destinaron más de 14 millones de metros cúbicos de madera para la fabricación de tarimas (Marshall 2000). Esta cifra se genera, como se indicó, en parte por el incremento en el comercio internacional, pero también es debida a la necesidad de reemplazar una gran cantidad de tarimas que se destruyen en su manejo por la falta de resistencia, calidad, diseño y cuidados a los que se ven sometidas, aunado a que generalmente para su elaboración se dedica la madera de menor calidad o clase.

La baja calidad de la madera no solo se refiere a la presencia o cantidad de defectos naturales que pueda presentar cada pieza, también se puede deber a

la presencia de galerías de insectos, manchas de hongos cromógenos o partes de madera en estado de pudrición. Estos daños, aunque pueden ser visibles, en ciertos casos no presentan evidencias externas de la actividad de un insecto xilófago por ejemplo, nemátodos u hongos, además que las inspecciones no se pueden hacer físicamente a profundidad en la madera y menos en las cantidades que se manejan en las fronteras o aduanas, lo que ha ocasionado que frecuentemente los embalajes de madera transporten plagas de un país o de una región a otra, con las graves consecuencias ecológicas y económicas.

Por otro lado, hay que considerar que por la gran diversidad de modelos, medidas y aplicaciones, los embalajes de madera no se pueden identificar y caracterizar fácilmente, por ejemplo en México una sola empresa fabricante puede manejar en su catálogo más de 35 diseños y especificaciones de tarimas; aunado a esta situación, no existen limitantes sobre el tipo de madera a emplear, puede ser madera seca, sazónada o verde y, si a lo anterior se le suma que los embalajes de madera pueden permanecer mucho tiempo almacenados en contacto con el suelo, expuestos a la lluvia o condiciones insalubres, los riesgos de contaminación son elevados.

Como referencia, el número reportado de especies exóticas (introducidas) en los E.U. asciende a más de 2 000 insectos y arácnidos; 239 vegetales patógenos; más de 2 000 plantas y 142 invertebrados terrestres, entre otros organismos (Britton y Sun 2002). Varios de los insectos han ocasionado graves problemas de plagas con resultados destructivos en los bosques y cultivos, aparte de las pérdidas económicas que se estiman en más de 96 000 millones de dólares (*op cit.*). En México no se lleva un registro sistemático de plagas no nativas, sin embargo, entre los años 1994 y 2000 se tienen registradas 852 intercepciones de organismos patógenos¹, resaltando que de ellos el 39% fueron detectados en embalajes de madera.

¹ Dirección General de Gestión Forestal y de Suelos; Centro Nacional de Referencia en Parasitología Forestal. Octubre de 2004.

NORMATIVIDAD VIGENTE

Como se indicó en el marco de referencia, la FAO en marzo de 2002 adoptó la NIMF N° 15 denominada: "Directrices para Reglamentar el Embalaje de Madera Utilizado en el Comercio Internacional". Esta Norma reconoce el riesgo fitosanitario asociado con el embalaje de madera y todos los países firmantes de la Convención Internacional de Protección Fitosanitaria, están comprometidos a su cumplimiento, incluyendo México.

La NIMF No. 15 describe las medidas fitosanitarias para reducir el riesgo de introducción y diseminación de plagas cuarentenarias asociadas al embalaje de madera, fabricado con madera en bruto de coníferas y latifoliadas, utilizado en el comercio internacional, incluyendo una Marca reconocida internacionalmente; dichas medidas reconocidas consisten en el tratamiento térmico o en la fumigación con bromuro de metilo, siendo el tratamiento térmico el de más amplia aplicación.

En este sentido, en México la **NOM-144-SEMARNAT-2004**, es la base normativa que establece los requisitos de aplicación del tratamiento fitosanitario al embalaje de madera que se pretende utilizar en la exportación.

Con el propósito de dar a conocer los aspectos fundamentales que originaron la elaboración del presente folleto, a continuación se presenta un resumen explicativo del contenido de la NOM-144-SEMARNAT-2004. En caso de requerir mayor información el lector debe consultar directamente la Norma citada.

La NOM-144-SEMARNAT-2004 tiene como objetivo establecer las medidas fitosanitarias para el embalaje de madera que se utiliza en el comercio internacional de bienes y mercancías, sus especificaciones técnicas y el uso de la Marca reconocida internacionalmente para acreditar la aplicación de dichas medidas fitosanitarias

Las medidas fitosanitarias aprobadas internacionalmente y que se establecen en la NOM-144-SEMARNAT-2004 para el tratamiento del embalaje de madera que se utilice en el comercio internacional, son el térmico (HT) y la fumigación con bromuro de metilo (MB).

El tratamiento térmico (HT por sus siglas en inglés) consiste en el calentamiento del embalaje de madera, de acuerdo con un programa de tiempo y temperatura que permite alcanzar una temperatura mínima al centro de la tabla de 56°C por un mínimo de 30 minutos.

El tratamiento de fumigación con bromuro de metilo (MB por sus siglas en inglés), consiste en la fumigación del embalaje de madera de acuerdo con un programa que toma en cuenta la temperatura, concentración y tiempo de exposición.

La NOM-144-SEMARNAT-2004 también establece que el embalaje de madera marcado, que sea sometido a reparación o reconstrucción y que pretenda utilizarse en la exportación de mercancías, debe ser tratado y remarcado después de ser reparado o reconstruido.

Para el caso de las instalaciones para aplicar el tratamiento térmico, la NOM-144-SEMARNAT-2004 indica que deben contar como mínimo, entre otros varios aspectos, con lo siguiente:

- Sistema de calefacción suficiente para alcanzar y mantener 56°C al centro de la madera por 30 minutos
- Sistema de circulación de aire o ventilación
- Sistemas automáticos o semiautomáticos de medición, regulación y registro del proceso
- Dos o más sensores (termopares), para la medición y registro de la temperatura al centro del elemento más grueso del embalaje de madera
- Sistema de humidificación, cuando se trate de estufas de secado.

Las instalaciones para aplicar el tratamiento de fumigación con bromuro de metilo deben contar, entre otras especificaciones, con lo siguiente por ejemplo:

- Dosificador volumétrico para cilindros de bromuro de metilo
- Aplicador para latas de bromuro de metilo con válvula de paso
- Evaporador a base de gas LP para bromuro de metilo, con capacidad mínima de 6 000 kcal/h (23 600 BTUH)

- Mangueras de polietileno de 6.35 mm de diámetro para introducción de bromuro de metilo
- Cintas adhesivas de 0.10 m de ancho para sellado
- Bodega para almacenamiento de bromuro de metilo, cubierta y de preferencia enrejada, con plena ventilación, ajustándose a las normas que establezcan las dependencias competentes en salud pública y medio ambiente.

Para saber todas las especificaciones requeridas para ambos tipos de tratamientos se debe consultar la Norma NOM-144-SEMARNAT-2004.

Como el tratamiento térmico fitosanitario al embalaje de madera representa un fenómeno termodinámico en el cual intervienen diferentes estados de la materia como son sólido —la madera misma—; líquido —el agua incluida—, y gaseoso —el aire en la madera seca—, es importante tomar en cuenta ciertas condicionantes y factores que intervienen durante el proceso de calentamiento al que se someterá el embalaje, además de las características mismas de la madera como es su densidad básica, su contenido de humedad y el espesor de las piezas con que está armado el embalaje.

Esta información se incluye en la presente guía dado que el tiempo de calentamiento de la madera, el consumo de energía y el efecto que tendrá el calentamiento sobre las propiedades de la madera, principalmente, no son los mismos si se trata por ejemplo de un embalaje de madera de alta densidad como la de encino o de mediana densidad como la de pino; el consumo de energía para alcanzar los 56°C en el centro de la madera no será el mismo si se trata de calentar madera verde, con un alto contenido de humedad, o si el embalaje esta hecho ya con madera seca, independientemente que la Norma no especifique que deba ser madera seca. Igualmente, si el tratamiento térmico se hace con un flujo de aire caliente seco o si éste se realiza con aire caliente húmedo, el efecto será un tanto diferente.

El entender un poco sobre estos aspectos por parte del fabricante de embalajes y el encargado de realizar el tratamiento térmico les permitirá conocer, entender y comprender el efecto de la aplicación de calor a la madera, el efecto que puede tener el contenido de humedad de la madera, así como el efecto de la humedad relativa del aire de calentamiento en el tiempo requerido para alcanzar la temperatura de 56°C en el centro de la madera y sus implicaciones, aspectos que se describen a continuación.

FACTORES A CONSIDERAR PARA LA APLICACIÓN DEL TRATAMIENTO TÉRMICO AL EMBALAJE DE MADERA.

4.1 Aplicación de calor en la madera

4.1.1 *Calor específico y capacidad térmica de la madera*

En todo proceso de calentamiento de un material, el tiempo que tarde en alcanzarse una determinada temperatura y la cantidad de energía térmica que se requiera, dependerá de las características del material que se trate, si es un líquido o un sólido y si éste sólido es muy poroso o no, además obviamente de la cantidad de material que se requiera calentar. Si el embalaje de madera está elaborado con madera seca se requerirá una determinada cantidad de energía para su calentamiento, pero si el embalaje de madera está hecho con madera verde, además de la energía requerida para calentar la madera se necesitará otra cantidad adicional para calentar el agua incluida en la madera hasta la temperatura que establece la Norma, lo que incrementa el consumo energético y gasto de combustible.

En este sentido, la cantidad de energía requerida para el calentamiento de un determinado volumen de madera se puede definir como capacidad térmica y ésta a su vez dependerá de la cantidad de calor que se requiera para elevar la temperatura de una unidad de masa de dicho material (madera), concepto que se conoce como calor específico. Estos aspectos se describen brevemente a continuación.

El calor específico se define como la cantidad de calor en kilocalorías (kcal), necesaria para aumentar en 1°C la temperatura de 1 kg de materia, es decir, este concepto nos dice que cantidad de energía se requerirá, por ejemplo, para calentar un kilogramo de madera de 20°C a 21°C, de 21°C a 22°C y así sucesivamente. Para una determinada cantidad o peso de materia esta cantidad de calor será diferente según sea el incremento de temperatura deseado y la masa o cantidad de materia a calentar, de manera que la cantidad de calor

requerida, denominada capacidad térmica, para el aumento de temperatura de una masa dada será:

$$Q = m \cdot c (T_f - T_i) \quad (\text{kcal})$$

donde Q es la cantidad de energía o capacidad térmica requerida, m es la masa o peso anhidro (peso de la madera exenta de agua), T_f es la temperatura final a alcanzar (por ejemplo los 56°C) y T_i es la temperatura de inicio (temperatura de la madera antes de iniciar el tratamiento térmico), c es el valor del calor específico medio para el rango de cambio de temperatura.

La madera completamente seca (anhidra), comparada con el agua, tiene un calor específico muy bajo, para el agua es de 1 kcal/kg °C, mientras que para la madera anhidra el valor medio entre 0 °C y 100 °C es de 0.284 kcal/kg °C. Esto significa que si queremos calentar un litro de agua, que pesa un kg, de 1°C a 2°C, se requerirá una kcal; por el contrario, si queremos calentar un kg de madera totalmente seca, se requerirá solamente 0.284 kcal, menos de una tercera parte. En cambio, comparada con otros materiales sólidos, como el acero o el concreto, el valor del calor específico de la madera se considera como muy alto, esto significa que para alcanzar una determinada elevación de temperatura se requerirá aplicar mucho más energía a la madera que a esos otros materiales. Este valor aumenta considerablemente con el contenido de humedad de la madera, teniendo en cuenta, como se indica, que el calor específico del agua es de 1 kcal/kg °C. Así mismo, se ha comprobado que el calor específico de la madera es independiente de la especie (Fuentes s/ñ).

Por otro lado, el calor específico de la madera completamente seca (anhidra), se comporta como el de otros materiales, incrementándose con el aumento de la temperatura, siendo estimado, para el caso de °C, por el modelo:

$$c = 0.226 + 0.00058(T_i + T_f) \quad (\text{kcal/Kg } ^\circ\text{C})$$

Así, la capacidad térmica de la madera húmeda Q_t puede determinarse por la evaluación de la cantidad de calor requerido para producir una determinada elevación de temperatura de la pieza de madera anhidra, más la cantidad de calor necesario para producir el mismo cambio de temperatura en el agua incluida, o sea:

$$Q_t = Q_{\text{madera}} + Q_{\text{agua}}$$

Matemáticamente esto se expresa como:

$$Q_t = m c (T_f - T_i) + m (CH/100) c (T_f - T_i)$$

Debido a que el calor específico de agua es 1 kcal/kg °C y que la diferencia de temperaturas en ambos casos es la misma, esta ecuación se simplifica (Fuentes *s/f*) y su aplicación para la madera húmeda queda como:

$$Q_t = m (T_f - T_i) (c + CH/100)$$

donde:

- Q_t = Cantidad de calor, en kilocalorías, para calentar la madera
- m = Peso anhidro de la madera (se estima aplicando el valor de su densidad básica (D_b) en kg/m^3 (Peso anhidro por unidad de volumen verde)
- T_f = Temperatura final (por ejemplo 56°C)
- T_i = Temperatura inicial (antes del tratamiento)
- c = Calor específico de la madera para el rango de temperatura
- CH = Contenido de humedad de la madera, en porciento, base peso anhidro

Al aplicar este modelo a un grupo de cinco tipos de maderas para estimar la cantidad de calor, en kcal, para elevar la temperatura de 1m^3 de madera de diferentes densidades básicas y a diferentes contenidos de humedad, para el rango de 15°C hasta 56°C, considerando esta última como la requerida en la Norma para tratamiento térmico fitosanitario y la inicial como promedio de la madera en condiciones normales, se obtienen los resultados presentados en el Cuadro 1.

Cuadro 1.

Capacidad térmica, en kcal/m³, de 15°C a 56°C para cinco tipos de maderas de diferentes densidades básicas (D_b) y niveles de contenido de humedad

Db (kg/m ³)	Contenido de humedad (%)							
	0	10	20	30	40	60	80	100
350	3 539	4 973	6 409	7 844	9 279	12 149	15 019	17 889
450	4 550	6 395	8 240	10 085	11 930	15 620	19 310	23 000
550	5 561	7 816	10 071	12 326	14 581	19 091	23 601	28 111
650	6 572	9 237	11 902	14 567	17 232	22 562	27 892	33 222
750	7 583	10 658	13 733	16 808	19 883	26 033	32 183	38 333

¿Qué información genera el Cuadro 1 para el caso de la aplicación del tratamiento térmico al embalaje de madera?; la cuestión es que dicho proceso de calentamiento representará para la empresa, en primer lugar, el consumo de combustible, ya sea para una caldera de vapor, para una caldera de agua caliente o bien, el consumo de gas para una cámara de combustión directa. Dicho consumo, y gasto, estará directamente relacionado con el consumo de energía que se requiera para el calentamiento del embalaje, y esto es precisamente lo que refiere el Cuadro 1, de manera que con ello se puede estimar la demanda de energía y su costo para realizar el tratamiento, baste estimar la cantidad de madera que se tendrá en la cámara de tratamiento y su contenido de humedad.

Por dar un ejemplo, para calentar un kg de madera de pino, con una densidad básica de 350 kg/m^3 y un contenido de humedad del 20% se requieren 6 409 kcal; en cambio, para la misma cantidad de madera, si se tratara de encino con una densidad básica de 650 kg/m^3 y ésta estuviese a un contenido de humedad del 60%, se requerirían 22 562 kcal para su calentamiento, es decir, más del triple de energía, aspecto que se debe tomar en cuenta para la determinación de la capacidad del sistema de calefacción de la cámara de tratamiento térmico.

Una vez alcanzada la temperatura de 56°C en el centro de la madera hay que considerar que dicha temperatura se debe mantener durante media hora; en este caso el consumo total de energía dependerá de la calidad del aislamiento térmico, fugas de aire y sistema de calefacción de la cámara.

4.1.2 Conductividad térmica en la madera

Aparte del consumo de energía térmica, otro aspecto que tiene importancia en la aplicación del tratamiento térmico al embalaje de madera, es el tiempo que tardará dicho tratamiento, es decir, ¿Cuanto tiempo se requerirá para alcanzar los 56°C en el centro de la madera desde que inicia el calentamiento de la cámara?, en este sentido se debe considerar el sistema de calefacción, si se hará con un flujo de aire caliente proveniente directamente de quemadores o si se trata de un sistema de calefacción indirecta, es decir, el calentamiento del aire de la cámara se realiza por intercambiadores de calor (tuberías) por donde se hace fluir vapor o agua caliente o aceite térmico.

Por otro lado e independientemente del sistema de calefacción, el calor del aire que circunda la madera debe conducirse desde la superficie hasta el centro de

la madera, ya que es allí donde se deben alcanzar — y medir—, los 56°C. ¿Cuanto tiempo tardará tal conducción del calor hacia el interior de la madera?, esto depende del espesor de la madera, entre más gruesa obviamente mayor tiempo; depende de la densidad de la madera y del contenido de humedad que presente, ya que el calor no se conduce igual en un sólido que en un líquido o un gas (aire), y esos tres estados de la materia se encuentran en la madera en diferentes proporciones según sea, precisamente, su densidad y contenido de humedad y, finalmente, dependerá de la rapidez con que se conduce el calor de manera particular en el material, concepto que se refiere al “coeficiente de conductividad térmica”.

Dicho coeficiente de conductividad térmica (λ) es la conductividad térmica por unidad de masa que equivale a aquella cantidad de calor, en kcal, que atraviesa, por hora, en estado de equilibrio, una pieza de madera de un metro de arista, desde una de sus caras a la opuesta, cuando entre éstas existe una diferencia de temperatura de 1°C. Conociendo ese valor unitario se puede estimar el tiempo que tardará en conducirse el calor en cualquier pieza de madera si se toma en cuenta sus dimensiones y rango de temperatura a elevar, entre otros aspectos.

En términos generales la madera es un material mal conductor del calor debido a sus propiedades fisicoquímicas y también debido a su elevada porosidad (Jiménez, 1999). La conductividad térmica en la madera varía con la dirección de flujo del calor respecto a la dirección de la fibra, con la densidad, con el tipo y cantidad de los extractos, con los defectos y, especialmente, con el contenido de humedad.

El coeficiente de conductividad térmica de la madera en la dirección radial es del 5 % al 10 % superior al de la dirección tangencial. Este mismo coeficiente en la dirección paralela a la fibra es de 2.25 a 2.75 veces el de la dirección perpendicular a la fibra, es decir, el calor en la madera se conduce más rápido en dirección a la fibra que en dirección transversal.

Para su cálculo se utiliza la expresión que indica que la conductividad térmica (λ) es directamente proporcional al área o superficie de la madera a través de la cual se aplicará el calor (A) a través de la cual fluye el calor, a la diferencia de temperaturas (δT) entre ambas caras de conducción, en este caso a la diferencia de temperaturas entre la superficie de la madera y la temperatura en su centro, así como al tiempo (t) que se quiera mantener el estado de

equilibrio; e inversamente proporcional a la distancia entre los puntos de conducción (d), lo que correspondería a la mitad del espesor de la madera.

$$\lambda = (A(\delta T)t) / d$$

De las varias investigaciones que se han hecho al respecto con madera, se ha encontrado que el coeficiente de conductividad térmica de la madera aumenta con la densidad de la madera, con su contenido de humedad y con el nivel de temperatura que se aplique, y que este coeficiente de conductividad térmica en promedio para la madera en estado anhidro o exenta de humedad, en dirección perpendicular al hilo es de:

$$\lambda_{\text{perpendicular}} = 0.362 \text{ kcal/m h } ^\circ\text{C}$$

donde:

m = Metro (distancia a recorrer por el calor)

h = Hora (tiempo de conducción del calor)

°C = Unidad de temperatura

En este sentido, el coeficiente de conductividad térmica del agua es:

$$\lambda_{\text{agua}} = 0.500 \text{ kcal/m h } ^\circ\text{C}$$

El valor anterior, es decir, el coeficiente de conductividad del agua indica que es superior al de la madera totalmente seca; esto significa que si la madera está con un determinado contenido de humedad y entre más elevado sea éste, "la conducción del calor hacia el interior de la madera será más rápida". En otras palabras, en el proceso de tratamiento térmico al embalaje de madera, "entre más húmeda este la madera del embalaje más corto será el tiempo para alcanzar los 56°C en el centro de la madera". (siempre y cuando durante el calentamiento no se genere la evaporación del agua contenida en la madera, ya que ese fenómeno ocasiona una pérdida de la energía de la madera calentada).

Cabe agregar que el modelo que representa el incremento de la conductividad térmica de la madera con el incremento de su contenido de humedad, reportado por Kollmann (1959), es:

$$\lambda_2 = \lambda_1(1 + 0.0125(\text{CH}_2 - \text{CH}_1))$$

4.1.3 Efecto del calor sobre los hongos en la madera

La temperatura es de una importancia trascendental para la rapidez de una pudrición causada por hongos. Existen relaciones directas con el crecimiento del micelio de hongos xilófagos, acelerándose hasta un óptimo y retrasándose luego hasta un máximo de temperatura, donde se suspende reversiblemente la actividad del desarrollo. Con el aumento de la temperatura sobre este máximo se entra a la zona mortal para el hongo.

En general, los límites de desarrollo de hongos no son muy amplios. Prácticamente no hay un crecimiento en temperaturas inferiores a 2°C y sólo unos pocos hongos pueden pasar los 40°C sin suspender el desarrollo de su micelio. Especies que pueden seguir su crecimiento en temperaturas mayores a 35°C son principalmente las de los géneros *Lentinus*, *Daedalea*, *Lenzites* y *Fomes*. El *Merulius* no se desarrolla en temperaturas mayores a 27°C. Las temperaturas mortales máximas para el micelio oscilan, según la especie, entre 45°C y 75°C (Kraemer 1958).

Al someterse la madera por un periodo mínimo de 10 minutos a temperatura de 40°C, pueden morir la mayoría de hongos presentes “en la superficie de la madera” (Rodríguez 1998). La temperatura ejerce un efecto diverso en los hongos según sea su magnitud o intensidad, Cuadro 2, para su eliminación debe considerarse la aplicación de temperaturas superiores a su nivel óptimo (23°C –33°C)

Cuadro 2. Temperaturas letales para 6 especies de hongos xilófagos.

Hongo	T. Letal (°C)
<i>Pulystictus versicolor</i> Fr	≥ 40
<i>Merulius lacrymans</i> Wilf	≥ 45
<i>Daedalea guercina</i> L.	≥ 30
<i>Lentinua lepideus</i> Fr.	≥ 60
<i>Lenzites sepiaria</i> Wolf	≥ 60
<i>Serpula lacrymans</i> Wilf	≥ 45

4.1.4 Efecto del calor sobre los insectos en la madera

El metabolismo de los insectos, en el sentido de un fenómeno químico, está directamente relacionado con la temperatura, en donde un aumento elevado de la misma provoca una aceleración del metabolismo biológicamente fatal, el cual puede causar un estado de coma entre los 42°C y los 50°C, y finalmente la

muerte del insecto a temperaturas superiores a los 50°C. Hay que considerar que el rango vital de temperatura en los insectos es variable de una especie a otra, variando también los óptimos, pero en general, se puede hablar de un rango de 18°C a 24°C, cualquier aumento o disminución reducirá su actividad y, en el caso de elevarse, se tendrán los efectos citados inicialmente (Kraemer 1958).

4.1.5 Efecto del calor sobre las propiedades de la madera

Cuando una madera es expuesta a un incremento progresivo de temperatura, al rebasarse los 98°C y hasta 130°C aproximadamente, se evapora parte del agua contenida y algunos compuestos volátiles, como pinenos (aguarrás). De unos 120°C a 200°C la madera empieza a descomponerse lentamente. Estos efectos son poco visibles, pero se notan por la pérdida de peso. A temperaturas superiores a los 200°C la reacción se acelera y a partir de 275°C empieza con rapidez el desprendimiento de gases combustibles (inflamación). Cabe decir que las temperaturas entre 70°C y menos de 100°C sólo pueden ser perjudiciales cuando su influencia dura mucho tiempo (días).

Hay que considerar que la baja conductividad térmica que caracteriza a la madera y el valor del calor específico de la misma hacen que el calentamiento interno de la madera sea un proceso lento, Figura 1, y con ello los efectos que pueda tener el calor aplicado al embalaje en un periodo relativamente corto no tiene por sí solo implicaciones en las propiedades físico-mecánicas, más allá de las derivadas de la evaporación del agua higroscópica. Por debajo de 100°C, casi no se escapa de la madera más que el vapor de agua, incluso si la temperatura externa es superior a 100°C la de la madera se mantiene igual a 100°C hasta que el agua no se haya evaporado del todo.



Figura 1. Sección de un polín de madera carbonizado en su exterior por un incendio, pero íntegro en el interior, debido a la baja conductividad térmica (Foto: M. Fuentes)

En la práctica en la madera no se manifiesta el fenómeno de dilatación térmica (aumento de dimensiones por incremento de la temperatura) ni la pérdida de rigidez por efecto de la elevación de la temperatura, como sucede en los metales, debido al hecho que la madera, cuando se calienta, puede perder agua higroscópica con el consecuente fenómeno de contracción, que resulta ser superior al de dilatación, contrarrestando así su efecto, o sea que en condiciones normales de servicio, la madera cuando se calienta no presenta los problemas de dilatación térmica y pérdida de rigidez como sucede con otros materiales, ya que dicho calentamiento, al provocar un secado, genera más bien una contracción de la madera y un incremento en su rigidez y resistencia mecánica.

Respecto a la posible presencia de grietas superficiales en la madera por efecto del calor aplicado, debe considerarse que éstas se manifiestan cuando se provoca una evaporación rápida del agua de las capas superficiales, y a su vez este proceso se manifiesta si se aplica un aire muy caliente y seco durante tiempo prolongado, de manera que la mejor forma de evitar el agrietamiento superficial es aplicar el calentamiento de la madera con un aire lo más húmedo posible —lo que reduce la evaporación—, y mantenerlo solo durante el tiempo mínimo necesario.

Cabe también indicar que la madera de algunas especies sobre todo aquellas que son poco permeables, la aplicación de altas temperaturas cuando presentan también altos contenidos de humedad, puede ocasionar el aplastamiento y deformación (colapso) de sus células y también la formación de grietas internas (apanalamiento), Figura 2, de manera que debe cuidarse el nivel de temperatura inicial aplicado, de acuerdo a la especie que se trate, pues mientras la madera de pino puede soportar temperaturas iniciales de hasta 75°C, las latifoliadas como los encinos, las maderas duras tropicales y ahora el eucalipto que se empieza a destinar también a embalajes, en lo general no es recomendable someterlas a temperaturas superiores de los 60°C en el tratamiento térmico para evitar los riesgos del colapso y del apanalamiento. Al respecto hay que aclarar que si bien la temperatura que se debe alcanzar, según la Norma, es de solo 56°C, para alcanzar ésta en el centro de la pieza debe aplicarse un aire con una temperatura superior para que pueda haber un gradiente térmico del exterior hacia el interior y se pueda dar precisamente la difusión térmica hacia el interior de la madera.

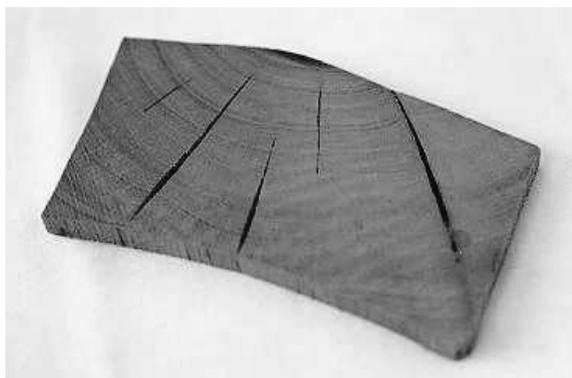


Figura 2. Sección transversal de un barrote de madera con severo apanamiento, (grietas internas),
(Foto: M. Fuentes)

4.2 Influencia del contenido de humedad (CH) de la madera

4.2.1 Contenido de humedad de la madera

Si bien la Norma NOM-144-SEMARNAT-2004 no hace referencia ni exigencias respecto al contenido de humedad (CH) de la madera de los embalajes, si es un aspecto importante a conocer en el producto, ya que tiene influencia en el peso del embalaje, en su resistencia mecánica, en la resistencia de la madera del embalaje hacia el ataque de hongos manchadores y de pudrición y, como se verá más adelante, en el efecto del tratamiento térmico en el sentido de tiempo de calentamiento y consumo de energía para alcanzar los 56°C en el centro de la madera.

El nivel de humedad que presenta la madera se denomina contenido de humedad, y representa la cantidad de agua contenida en una pieza de madera, pero expresada en porcentaje referido al peso seco (anhidro) de la misma. Así, una pieza que registre por ejemplo un 10% de CH, significa que la cantidad de agua que contiene, equivale, en peso, al 10% de lo que pesaría esa misma madera si estuviese totalmente seca. Igualmente, si una madera cuyo peso anhidro es de 2000 g y se le agregan 500 g de agua, su contenido de humedad final será

$$\begin{aligned}\text{CH (\%)} &= (\text{Peso del agua/Peso anhidro})100 \\ &= (500 \text{ g} / 2000 \text{ g})100 \\ &= 25 \%\end{aligned}$$

Por la forma de cálculo y la porosidad de la madera, el contenido de humedad en la madera puede ser superior al 100%, llegando a variar desde 0% (madera anhidra) hasta más del 750% (en *Ochroma* sp.), aunque en condiciones naturales, – madera verde recién cortada–, no rebasa normalmente el 150% en las maderas moderadamente ligeras.

Para medir el contenido de humedad en la madera, se puede utilizar el método de pesadas, el medidor eléctrico (xilohigrómetro) y en algunas condiciones el método de destilación.

El método de pesadas es de los más precisos, permite obtener lecturas en cualquier nivel de humedad de la madera, pero es un proceso tardado y que requiere el corte de la madera para hacer la evaluación. En una muestra se corta una pieza de unos 2.5 cm de largo, se pesa (P_i), posteriormente se somete a deshidratación en un horno para evaporar toda el agua hasta registrar un peso constante o peso anhidro (P_o) y se aplica la ecuación:

$$CH (\%) = [(P_i - P_o) / P_o] 100$$

Por otro lado, el uso de medidores eléctricos de humedad (xilohigrómetros) permite obtener lecturas inmediatas y sin necesidad de cortar la madera; sin embargo, las lecturas de estos aparatos solamente son confiables en el rango del 6% al 28% de CH. Existen dos diseños generales, los denominados de resistencia, provistos con dos electrodos a manera de agujas, mismas que se introducen en la madera y a través de los cuales se hace pasar una corriente eléctrica directa. En estos diseños según sea el contenido de humedad que presente la madera será la resistividad al paso de la corriente eléctrica, reportándose directamente el valor de CH en la carátula del aparato, Figura 3a.

El segundo diseño se denomina de capacitancia y no requiere agujas, ya que al ponerse en contacto con la madera, registra el potencial dieléctrico de la madera, mismo que es proporcional al contenido de humedad que presenta, registrando éste directamente en la carátula, Figura 3b.

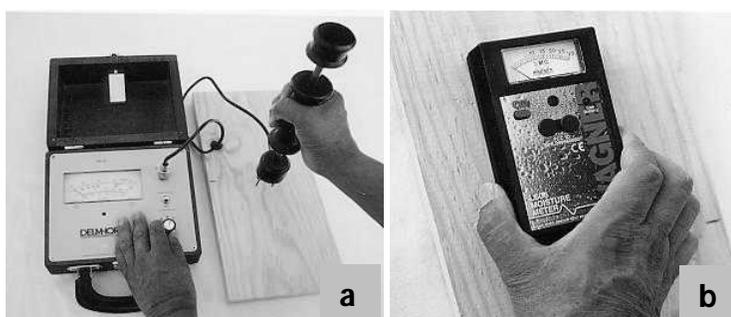


Figura 3. Medidores de humedad xilohigrómetros) para madera
(Fotos: M. Fuentes)

Finalmente, para madera que contiene aceites, productos de impregnación o significativas cantidades de compuestos volátiles, la forma más confiable de evaluar su contenido de humedad es sometiéndola a un proceso de destilación con ayuda de un solvente no miscible con el agua.

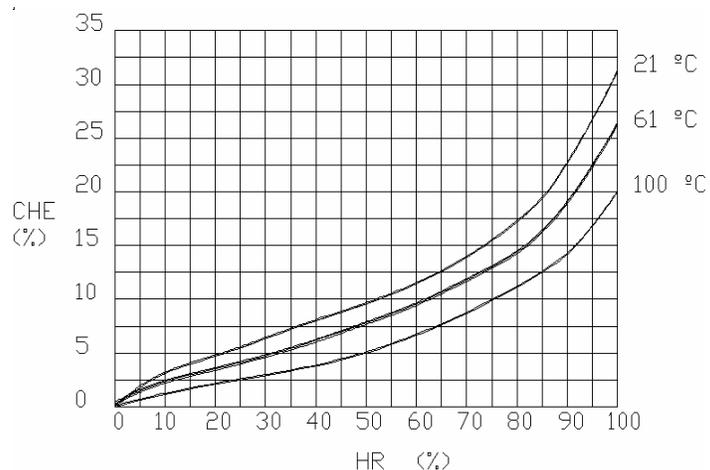
4.2.2 Contenido de humedad en equilibrio (CHE)

La madera es un material higroscópico, es decir, que su contenido de humedad al cual se estabilice estará en función de la temperatura y de la humedad relativa (HR) del aire que la rodea, principalmente de esta última. Para madera que está en servicio, si la HR del aire aumenta, la madera seca adsorberá humedad y elevará su CH; si desciende la HR posteriormente la madera también disminuirá su CH hasta lograrse una estabilidad o equilibrio, conociéndose dicho valor como "contenido de humedad en equilibrio" (CHE).

Cuando el tratamiento térmico se desee llevar a mayores especificaciones de las establecidas en la NOM-144-SEMARNAT-2004, es decir se quiera además voluntariamente secar la madera hasta un cierto contenido de humedad, se debe secar la madera precisamente al CHE del lugar y condiciones de servicio en que se usará, ya que con ello también se reducen los cambios dimensionales por efectos de contracción e hinchamiento, el riesgo de manchado, así como el posible agrietamiento, entre otras varias ventajas.

Según sean las condiciones climáticas, la época del año, la zona geográfica y el tipo de aplicación o uso de la madera, el CHE varía entre 6% y 18% de contenido de humedad. La Figura 4 ilustra cómo varía el CHE con la HR del aire, para madera de pino a temperaturas de 21°C, 61°C y 100°C.

Figura 4. Variación del contenido de humedad en equilibrio (CHE) de la madera, con la temperatura y humedad relativa del aire (HR)



A nivel internacional, se considera madera seca aquella que tiene un CH inferior al 18%. Ahora bien, para conocer el contenido de humedad en equilibrio de cualquier lugar, es necesario determinar la temperatura y humedad relativa del aire en dicha zona, para ello existen aparatos portátiles como es el psicrómetro, Figura 5a, y el termohigrómetro con anemómetro, Figura 5b, los cuales permiten hacer lecturas directas de tales variables.

Ahora bien la NOM-144-SEMARNAT-2004, no considera que el embalaje de madera se deba llevar a un cierto contenido de humedad, sin embargo, en muchas ocasiones las empresas han optado por tener una mayor calidad del embalaje por el tipo de mercancías transportadas, por un estándar de calidad, o para prevenir el manchado del embalaje de madera y mercancías cuando se transportan en contenedores o bodegas de barcos que van cerradas, en estos casos sí es importante considerar el contenido de humedad de equilibrio o simplemente el uso de embalajes de madera seca.

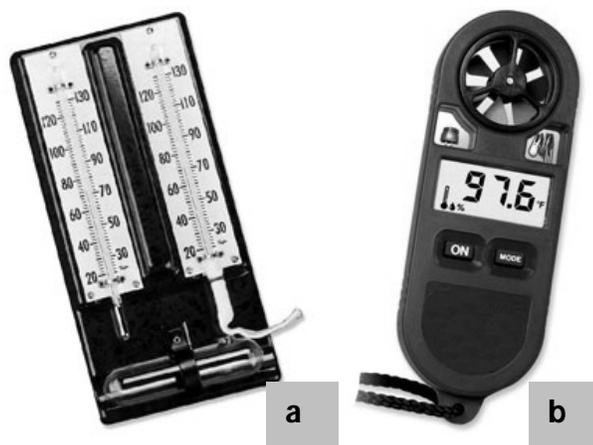


Figura 5.

Modelos de psicrómetro (a) y termohigrómetro (b) portátiles

4.2.3 Efecto del CH en el desarrollo de los hongos

Los hongos son seres vivos pertenecientes al reino *Fungi*, y como tales, requieren del agua para que sus esporas puedan germinar, para producir sus enzimas y trasladar los nutrientes a través del micelio y en general, para desarrollar todas sus actividades fisiológicas. De acuerdo a la familia, género y especie a los que pertenezcan, será el nivel de humedad óptimo que requieran, pero siempre abarcando un amplio rango entre el mínimo y máximo.

Los hongos imperfectos (*Fungi imperfecti*), que tienden a desarrollarse en la superficie de la madera recién aserrada, son los que demandan mayor nivel de humedad. Los hongos cromógenos (*Ascomycetes*) que causan el manchado profundo de la madera recién aserrada o sin secar se pueden desarrollar en madera cuyo contenido de humedad está por arriba del 18%.

Como estos hongos manchadores se desarrollan rápidamente, es aconsejable realizar el secado de la madera lo más pronto posible hasta niveles inferiores del 18% de CH, ya que como se indicó, a ese nivel ya no hay suficiente humedad para la germinación de las esporas y desarrollo de los hongos, evitándose con ello el manchado y desclasificación de la madera, Figura 6.



Figura 6. Tarima de madera de encino y pino verdes, manchada por hongos cromógenos.
(Foto: M. Fuentes)

Respecto a los hongos xilófagos causantes de la pudrición (*Basidiomycetes*), obviamente también requieren de humedad para su acción degradante, sin embargo, para su desarrollo es necesario que las condiciones de alta humedad se mantengan un tiempo prolongado —como la madera en contacto con la tierra—, siendo también más variable el nivel óptimo de humedad que requieran, según la especie, por lo que las condiciones adecuadas de almacenamiento, como el evitar que la madera esté en contacto con el suelo o expuesta a la lluvia, son indispensables.

De lo anterior se deriva que la primera y mejor forma de evitar el ataque y desarrollo de hongos en la madera, cualquiera que sea su clase, es secar la madera y mantenerla seca a niveles inferiores del 18%.

4.2.4 Efecto del CH en el desarrollo de los insectos

La destrucción de la madera por animales es llevada a cabo especialmente por insectos, los cuales barrenan la madera para desarrollar su alimento (ambrosía) o bien, para completar su metamorfosis —huevo, larva, pupa y adulto—, dentro de ella.

El desarrollo de los insectos destructores de la madera denominados xilófagos, está influenciado como sucede en los hongos, por una serie de factores entre los cuales están la cantidad y tipo de alimento, la temperatura y el contenido de humedad; este último condiciona hasta cierto grado la presencia de los insectos y en tal sentido se distinguen dos grandes grupos: insectos de madera verde e insectos de madera seca.

Los insectos de madera verde, por ejemplo de las familias *Cerambycidae*, *Scolytidae* y *Platypodidae*, atacan árboles vivos, en decadencia y troncos recién cortados y madera con elevado contenido de humedad. A este grupo, entre muchos otros, pertenecen los llamados insectos de ambrosía o ambrosiales, los cuales se caracterizan por inocular un hongo cromógeno en las perforaciones que realizan, mismas que manchan la madera y que les sirven de alimento a las larvas. Estos insectos ambrosiales realizan en la madera sus perforaciones solo cuando ésta tiene un contenido de humedad suficiente para el crecimiento del hongo, más del 18%, pues es su base de alimento. Por la misma condición de la madera, los insectos que atacan madera verde se convierten en el grupo más peligroso en caso de propagación, debido a que pueden afectar los bosques y selvas y causar graves daños ecológicos.

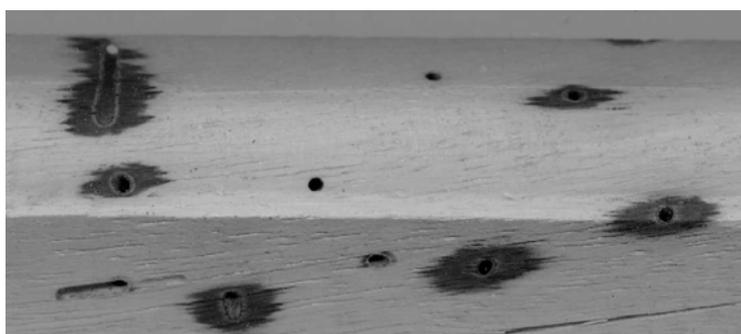


Figura 7. Madera verde de *Hevea brasiliensis* (hule) atacada por insectos ambrosiales (Foto: M. Fuentes)

Los insectos de madera seca pueden atacar madera de construcción, muebles, pisos y todo artículo de madera aunque ésta esté muy seca. A diferencia de los anteriores, pueden pasar muchas generaciones en el mismo sustrato y varios

meses dentro de la madera en estado larval. A este grupo pertenecen varios géneros de las familias *Annobiidae*, *Lyctidae* y *Termitidae*, que pueden estar presentes en los embalajes de madera sin que su presencia se detecte a simple vista.

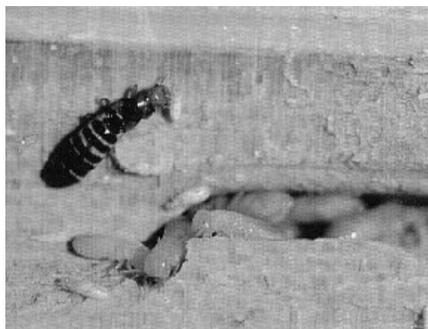


Figura 8. Galería de *Incisitermes minor*
(Cibrian *et al.* 1995)

De lo indicado hasta el momento respecto al efecto del contenido de humedad de la madera, independientemente de que se pretenda secar o no la madera, se ha demostrado no obstante que el tratamiento térmico a 56°C durante media hora al embalaje de madera, como lo establece la NOM-144-SEMARNAT-2004, es suficiente para eliminar las esporas, hongos e insectos que puedan estar presentes, convirtiéndose en una de las medidas más prácticas para tal propósito.

4.2.5 Efecto del CH en la capacidad térmica de la madera

Por lo expuesto en el apartado 4.1.1, en el proceso de calentamiento de la madera debe considerarse que entre más húmeda esté la madera, mayor será la demanda de energía térmica requerida para alcanzar los 56 °C en la madera —temperatura de tratamiento que indica la NOM-144-SEMARNAT-2004-, por lo que pareciera lógico pensar que si se utiliza madera seca para fabricar el embalaje, se tendrá un ahorro de energía en el proceso; sin embargo, como se indica en los incisos 4.1.1 y 4.1.2, el nivel de humedad tiene por el contrario, un efecto indirecto con el tiempo de calentamiento, a mayor contenido de humedad se mejora la conductividad térmica y menor será el tiempo para alcanzar una determinada temperatura, reflejándose en menor tiempo del tratamiento térmico y mayor productividad y aprovechamiento de la cámara, por lo que, aparte de considerar la demanda menor de energía (madera seca) deberá tomarse en cuenta la conductividad térmica que rige el tiempo de calentamiento.

4.2.6. Efecto del CH en el tiempo de calentamiento de la madera

Derivado de lo expuesto en el inciso 4.1.2, la conductividad térmica de la madera aumenta con el contenido de humedad, esto se debe a que la conductividad térmica es diferente en los tres estados de la materia: sólido, líquido y gas, siendo mayor en los sólidos, menor en los líquidos y mínimo en los gases.

En la madera seca, los poros de las células o de la madera contienen aire, el cual es un mal conductor del calor, aparte de que las paredes celulares solo contienen agua parcialmente, de manera que si se hace el calentamiento a la madera en estas condiciones, el tiempo para alcanzar los 56°C en el interior demandará un tiempo relativamente prolongado, dada la baja conductividad térmica del aire.

Cuando la madera está verde, es decir, contiene agua en sus poros, se presentará una mayor conductividad térmica hacia el interior de la pieza de madera, dada la mejor conductividad térmica del agua en comparación a la del aire, lo que significa que se logrará el calentamiento del centro de la madera en menor tiempo en madera verde, en comparación con la madera seca. Aquí hay que considerar un aspecto muy importante; esa reducción en el tiempo de calentamiento solamente se dará si se evita la evaporación del agua de la madera durante el tratamiento, pues de otra forma el efecto será contrario, ya que la evaporación del agua "absorbe" energía, lo que se refleja en un enfriamiento de la madera y, por lo tanto, un retraso en el proceso de calentamiento, como lo demuestra Simpson (2002) en la gráfica de la Figura 9.

La forma más efectiva de evitar dicha evaporación del agua es realizando el calentamiento en una atmósfera lo más cercana a la saturación del aire, o sea con un aire caliente y con una humedad relativa cercana al 100%. Esta condición se complementa con el fenómeno de difusión del vapor de agua; como el calentamiento se da a partir de las capas superficiales de la madera, el agua de esa zona, si se evapora y evita que dicho vapor se desprenda, se difundirá hacia el interior de la pieza acelerando la conductividad térmica y reduciendo así aún más el tiempo para alcanzar los 56°C en el centro de la pieza.

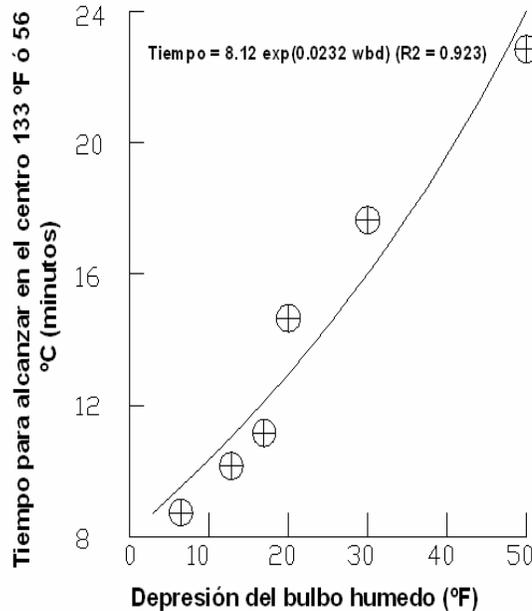


Figura 9. Efecto de la depresión del bulbo húmedo, en el tiempo de calentamiento de la madera (Simpson 2002)

No obstante, por lo indicado en 4.1.1 y 4.1.2, no debe olvidarse que dicho nivel de humedad demanda también más energía térmica para su calentamiento, por lo que debe realizarse en cada caso una estimación del punto de equilibrio entre conductividad térmica, la capacidad térmica, el contenido de humedad de la madera y los costos.

Reforzando lo anterior y complementando las expresiones matemáticas de conductividad térmica indicadas en el inciso 4.1.2, el Laboratorio de Productos Forestales de Madison en los Estados Unidos (FPL 1999), reporta para valores de contenido de humedad inferiores al 25%, que la conductividad térmica (λ) en la madera manifiesta una variación más o menos lineal en sentido transversal con el contenido de humedad y se puede estimar por la ecuación:

$$\lambda = Db[b + (c CH)] + a \quad (\text{w/m k})$$

donde:

- λ = conductividad térmica, en wats por metro por kelvin
- Db = densidad básica de la madera (g/cm^3)
- CH = contenido de humedad, en %
- a, b, c = constantes de la ecuación

Para una $T = 24^{\circ}\text{C}$, $Db = 0.3 \text{ g/cm}^3$ y $CH = 24\%$, se tiene que, $a = 0.01864$, $b = 0.1941$ y $c = 0.004064$. (FPL 1999).

Con la ecuación anterior, el Laboratorio de Productos Forestales de Madison, EEUU, (FPL 1999), reporta los valores que se indican en el Cuadro 3 para cinco tipos de maderas.

Cuadro 3. Conductividad térmica de cinco maderas seleccionadas (FPL 1999)

Madera	Db (g/cm^3)	Conductividad (w/m k)	
		anhidra	al 12 % CH
Encino blanco	0.72	0.16	0.19
Encino rojo	0.66	0.15	0.18
Pino ponderosa	0.42	0.10	0.12
Pino blanco	0.37	0.09	0.11
Abeto	0.37	0.09	0.11

La madera entre mayor sea su CH hasta el 30% presenta mayor rapidez de conducción del calor (Poblete 2000, Simpson 2002). A niveles mayores de contenido de humedad esta relación se mantiene pero con una ventaja menor, ya que la demanda de energía para el calentamiento se incrementará, por lo que no es conveniente realizar los procesos de calentamiento a niveles por arriba del 30% (estado de humedad de la madera conocido como punto de saturación de la fibra).

Si a lo anterior se le agrega el efecto que tiene el contenido de humedad en los hongos (inciso 4.2.3) respecto al valor máximo para que no se manifieste su desarrollo (18% CH) puede concluirse entonces que el nivel recomendable de CH en la madera para realizar el tratamiento térmico establecido en la NOM-144-SRMARNAT-2004, en el sentido de ahorro de energía y reducción de tiempo, está en el rango del 18% al 30% de contenido de humedad (CH), prefiriéndose alrededor del primer valor. Valores inferiores de CH harán que se incremente el tiempo para alcanzar la temperatura deseada en el interior; por el contrario, a valores superiores de CH si bien reducirán el tiempo, incrementarán el consumo de energía y dejarán la madera susceptible del manchado fungoso.

4.2.7 Efecto del CH sobre las propiedades de la madera

La naturaleza higroscópica (adsorción de humedad) de la madera se debe básicamente a su estructura porosa y capilar, que permite el ingreso de líquidos

y vapores a su interior, así como a su composición química que se caracteriza por el elevado contenido de grupos hidroxilos que son altamente reactivos a las moléculas de agua de naturaleza polar. La variación en el contenido de humedad de la madera y el nivel que ésta propiedad presente, tiene gran influencia en el resto de las propiedades físico mecánicas de la madera como son:

- Una misma pieza de madera será más pesada a mayor contenido de humedad.
- Las maderas con contenidos de humedad por arriba del 18% son susceptible a ser atacada por hongos cromógenos y xilófagos.
- La madera con contenidos de humedad por arriba del 18% es más susceptible de ser atacada por insectos ambrosiales, (Escolítidos y Platipódidos).
- Entre mayor sea el contenido de humedad de la madera, en el rango higroscópico (0% a 30% CH), menor será su resistencia mecánica (dureza, rigidez y resistencia a la flexión, compresión, tracción y cortante).
- Las variaciones de contenido de humedad en el rango higroscópico, causan hinchamientos y contracciones, los que a su vez, por la naturaleza anisotrópica que le caracteriza, provoca las deformaciones, grietas y rajaduras en la madera.
- La madera con elevado CH es difícil de unir con adhesivos, no permite la fijación de pinturas y barnices y su calidad superficial ante el trabajo con máquinas y herramientas es deficiente.

Las anteriores son tan solo algunas de las consecuencias y efectos que tiene la presencia y la variación del agua en la madera, razón por la cual puede decirse que para todas las aplicaciones a que se destine la madera, es importante que se seque antes de ponerla en servicio, esto es, que se elimine el exceso de agua hasta dejarla al denominado contenido de humedad en equilibrio (ver inciso 4.2.2), para conseguir las diversas ventajas que caracterizan a la madera como material.

4.3 Influencia de la circulación del aire durante el tratamiento térmico

4.3.1 Función de la circulación del aire durante el tratamiento.

En una típica estufa de secado de madera se requiere que el aire circule continuamente a través de la pila de madera y de los sistemas de acondicionamiento por dos razones: el aire es el vehículo que transporta la energía térmica proveniente de los intercambiadores de calor hacia la madera, a la cual le entrega dicho calor para el proceso de movimiento y evaporación del agua en ella contenida; por otro lado, ese mismo aire en circulación es el encargado de arrastrar el vapor desprendido de la superficie de la madera y conducirlo hacia el exterior, para evitar que en la estufa se forme un microclima saturado y se detenga dicho proceso de secado. En el caso del tratamiento térmico fitosanitario, donde el objetivo no es secar la madera sino calentarla únicamente, también se requiere que el aire esté en circulación dentro de la cámara de tratamiento térmico, pues en ambos casos, —estufas de secado y cámaras de tratamiento térmico—, el calentamiento de la madera es por convección, es decir, mediante el flujo de aire caliente, y para lograrlo, es necesario que se cuente con un sistema para lograr dicho flujo o circulación del aire.

Cabe indicar que la eliminación o extracción del aire húmedo que se practica normalmente en una estufa de secado convencional cuando se seca madera, no es necesaria e inclusive conveniente realizarla cuando se trata de la aplicación de un tratamiento térmico solamente, por lo indicado en el apartado 4.2.6, a menos que se pretenda, además de la esterilización del embalaje, su secado, acción que debe hacerse hasta después que la madera se calentó completamente bajo una humedad cercana a la saturación.

4.3.2 Velocidad requerida del aire

Entre mayor sea la velocidad del aire en circulación mayor será la entrega de calor y, por lo tanto, más rápido será el calentamiento (siempre y cuando el aire se esté recalentando y no se genere evaporación del agua de la madera); sin embargo, resulta que a mayor velocidad del aire, el consumo de energía eléctrica de los motores de los ventiladores impulsores de dicho aire también se incrementa, pudiendo llegar a niveles en donde la velocidad y el gasto energético no necesariamente se reflejan en una mayor eficiencia del calentamiento.

Las velocidades del aire que se recomiendan, por ejemplo, en una cámara de secado, van de los 2 a los 3 m/s (media de 2.5 m/s); esta velocidad se considera adecuada para el flujo del aire en los equipos donde se aplicará el tratamiento térmico indicado en la NOM-144-SEMARNAT-2004.

4.3.3 Caudal requerido del aire

Similar a la velocidad, a mayor caudal (m^3/s) de aire que se suministre a la madera, mayor será la entrega de energía térmica y más rápido será el calentamiento; esto se debe a que entre mayor sea el volumen de aire suministrado a una determinada temperatura, éste conducirá mayor energía térmica hacia la madera en un mismo paso, lo que se reflejará en un calentamiento también más rápido.

Cuando se trata de cámaras de secado o tratamiento térmico, hay que considerar que el caudal de aire está directamente relacionado con la velocidad de rotación de los ventiladores, su número y diseño de aspas, el espacio entre las capas de madera, así como el diseño de la cámara y colocación de plafones o desviadores. No se cuenta con especificaciones precisas para determinar el caudal de aire de calentamiento adecuado para la madera, sino que más bien se hace referencia a las velocidades indicadas ya en el apartado 4.3.2, sin olvidar que son dos aspectos directamente correlacionados, ya que al establecer un mismo caudal impulsado por un ventilador a través de una sección o área, si esta se reduce (por ejemplo espesor de separadores) la velocidad de paso aumenta y viceversa.

Hay que recordar también, como se indicó, que tanto en los procesos de secado como en el tratamiento térmico establecido en la NOM-144-SEMARNAT-2004, el tiempo requerido para alcanzar una determinada temperatura en el interior de la madera depende tanto de la temperatura como de la humedad relativa (HR) del aire de calefacción, además de los efectos que tiene el espesor de la madera, su densidad, su contenido de humedad, su temperatura inicial (T_i), temperatura final (T_f) y la circulación del aire ya citados.

Idealmente las cámaras de tratamiento térmico como las estufas de secado, deben estar diseñadas de tal forma que el aire de calefacción pueda alternadamente circular a través del sistema de calefacción para elevar su temperatura y posteriormente circule a través de la pila de madera o embalajes para entregarle su energía calorífica; esto significa que deben dejarse espacios

laterales entre la madera y los muros de la cámara para el descenso y ascenso del aire en su proceso de circulación, figura 10, además de otros detalles que se indican en el inciso 5.2.

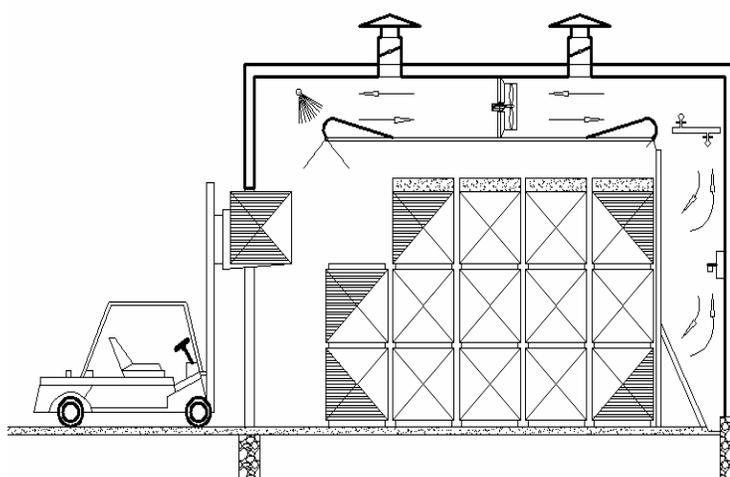


Figura 10. Ubicación de ventiladores y espacios necesarios para la circulación del aire de calefacción en una cámara.

SISTEMAS OPERATIVOS REQUERIDOS EN LA CÁMARA PARA TRATAMIENTO TÉRMICO FITOSANITARIO

5.1 Sistema de calefacción

5.1.1 Demanda de calor para el tratamiento térmico

En una cámara de tratamiento térmico se necesita calor para:

- Calentar el aire hasta la temperatura programada
- Calentar la cámara y el equipo
- Calentar la madera y el agua que ella contiene
- Reponer el calor que se pierde en el aire por fugas.

Las cámaras de secado que se emplean en la industria maderera para altos volúmenes de producción, pueden perfectamente utilizarse para el tratamiento térmico establecido en la NOM-144-SEMARNAT_2004 para los embalajes de madera. Estas cámaras son de tipo compartimiento que utilizan aire no saturado para transferir calor a la madera y, en sus casos, extraer la humedad de la madera por evaporación. Una de las fuentes de energía corresponde al uso de leña que se combustiona en un hogar especialmente diseñado y la energía liberada es transferida a un fluido térmico en una caldera. Otros energéticos pueden ser el gas LP, el gas natural, el diesel o incluso la electricidad. Los fluidos térmicos más utilizados son: vapor de agua saturado, aceite térmico y agua caliente presurizada. El vapor de agua es el de uso más frecuente en este tipo de equipos.

Las capacidades de calefacción requeridas también son variables y dependen del tipo de madera (especie) a tratar y en caso de secado su correspondiente programa (secuela) de secado. Para el caso del tratamiento térmico generalmente se aplican temperaturas alrededor de los 70°C constantes para cuando se trata de madera de pino, y los fluidos térmicos a utilizar para este caso corresponden principalmente a:

- Vapor saturado a presiones entre 4 y 6 kg/cm².
- Agua caliente de baja presión (< 10 m columna de agua).
- Aceite térmico a presión atmosférica o baja presión
- Gases de combustión directa.

Aún considerando que en algunos casos se utiliza vapor a presiones mayores a las indicadas anteriormente, no se justifica para este tipo de procesos. La demanda de energía térmica del sistema de calefacción para el calentamiento de la madera dependerá de la capacidad del volumen de madera de la cámara, así como de la densidad y contenido de humedad de la madera, del espesor de las piezas a calentar, y del tipo de intercambiadores de calor y del diseño mismo de la cámara, entre otros varios factores, lo que limita el reportar una cifra precisa a este respecto.

Como parámetro o referencia, para el caso de estufas de secado de madera se reportan algunas cifras de capacidad que debe tener el sistema de calefacción, así, por ejemplo el INFOR (1999) de Chile, indica 6.0 a 12.0 kW/m³ de madera, la Junta del Acuerdo de Cartagena (1989) presenta como requerimiento de calefacción para madera de pino y maderas latifoliadas livianas para un secado de hasta 100°C una capacidad aproximada de 11 200 kcal/m³ de madera. En los casos anteriores hay que considerar que están basados en demanda de energía para el secado de la madera, es decir, esas cifras incluyen la demanda de energía para la evaporación del agua, situación que no necesariamente se requiere para el tratamiento térmico establecido en la NOM-144-SEMARNAT-2004.

5.1.2 Tipos de generadores de calor



Figura 11. Caldera NARDI® para agua caliente mediante quemado de desperdicios de madera
(Foto: M. Fuentes)

En este sentido, de visitas hechas a plantas en operación que actualmente están realizando el tratamiento térmico establecido en la NOM-144-SEMARNAT-2004, se identificó por ejemplo que las cámaras trabajan satisfactoriamente con los siguientes equipos y capacidades de calefacción:

- Caldera de agua caliente a 95°C, para quemar madera, con una potencia térmica de 337 000 kcal/h (1'335 000 BTU/h) con una cámara para una capacidad de 15 millares de pies tabla (Mpt) ó 600 tarimas, Figura 11.
- Quemador de gas LP para calentamiento del aire a una temperatura estimada de 70°C, con un suministro calorífico de 151 515 kcal/h (600 000 BTU/h), en una cámara con capacidad de 200 tarimas. Figura 12.



Figuras 12. Equipo de combustión directa de gas LP en una cámara de secado. (Foto: M. Fuentes)

- Caldera para vapor de 125 CC (1'050 000 kcal/h ó 4'190 000 BTU/h) calibrada con una presión de trabajo de 6 kg/cm², para una temperatura de calefacción de hasta 90°C, y capacidad de suministro de vapor hasta para 4 cámaras de secado de 20 a 40 millares de pies tabla. Figura 13.
- Quemador de aceite térmico, usando combustóleo, de una capacidad térmica de 300 000 kcal/h (1'188 000 BTU/h) para una cámara con capacidad de 800 tarimas. Figura 14.

Para las cámaras con intercambiadores de calor constituidos por tubos aletados para vapor o agua caliente, Figuras 16 y 17, la capacidad de la caldera que requieren está en relación con el tamaño de la cámara, el volumen de aire a calentar, el volumen de madera a tratar o secar y con los niveles de temperatura a aplicar, como principales factores. Tomando las referencias de la empresa MOORE International, se recomienda 1.5 a 2.0 CC/Mpt (caballos de caldera por millar de pies tabla).

Para el caso de las cámaras de combustión directa con quemadores de gas, Figura 12, éstas deben ser capaces de generar un suministro de 300 000 kcal/h para cámaras con capacidad de 10 000 pies tabla y hasta 600 000 kcal/h para capacidades de hasta 40 000 pies tabla. Dicho quemador se conecta directamente con la parte superior de la cámara de tratamiento a través de un ducto que conduce los gases de combustión de gas LP, Figura 15.



Figura 13. Caldera para vapor mediante quemado de diesel. (Foto: M. Fuentes)



Figura 14. Quemador de aceite térmico (Foto: M. Fuentes)

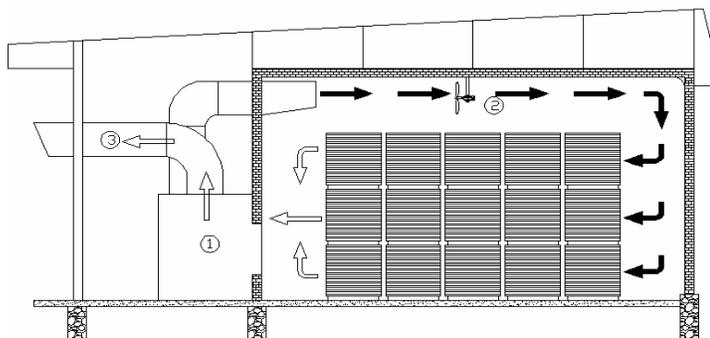


Figura 15. Ducto y flujo de entrada de gases de combustión en una cámara de combustión directa. 1) quemador, 2) ventilador auxiliar, 3) ducto de extracción de humedad.

En lo que se refiere a calentadores de aceite térmico, Figura 14, se pueden encontrar en el mercado con capacidades desde 75 707 kcal/h (300 000 BTU/h) hasta 2 020 000 kcal/h (8 000 000 BTU/h), requiriéndose, por sus cualidades de generar elevadas temperaturas sin elevación de presión, quemadores con capacidades de 75 707 kcal/h a 252 000 kcal/h (300 000 a un millón de BTU/h) para las cámaras de tratamiento térmico

5.1.3 Diseño de un sistema de calefacción

Respecto al diseño y colocación de los intercambiadores de calor del sistema de calefacción dentro de una cámara, para el caso de fuentes de calor conformados por intercambiadores de calor mediante tubos aletados (vapor, agua caliente o aceite térmico), se tienen ubicados en la parte superior de la cámara, sobre o al lado de un falso techo, en conjunción con los ventiladores, de manera que el aire que calentará la madera deba forzosamente hacer contacto con los intercambiadores de calor inicialmente para después circular a través de la carga de madera, Figura 16.

En la ubicación y diseño del sistema de calefacción de una cámara de tratamiento térmico, se puede optar por varias alternativas, Figura 18, lo fundamental es que el aire caliente pueda circular, después de su calefacción, a través de toda la carga de embalaje de madera en el interior de la cámara.

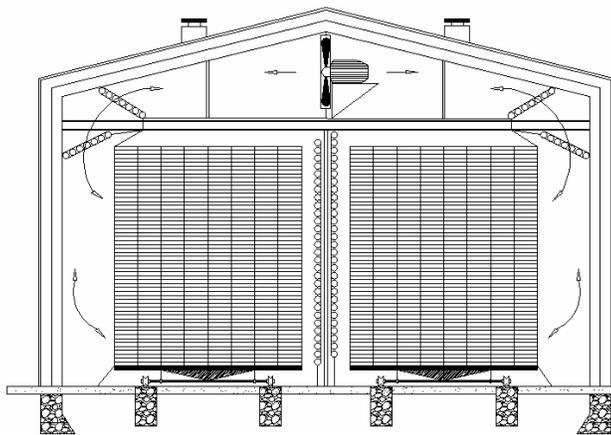
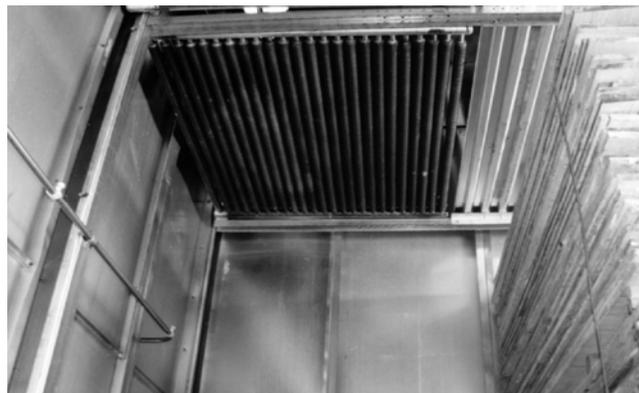


Figura 16. Diagrama de una estufa de secado con intercambiadores de calor tipo tubos aletados.

Figura 17. Intercambiadores de calor (tubos aletados) en una cámara de tratamiento térmico y secado de madera. (Foto: M. Fuentes)



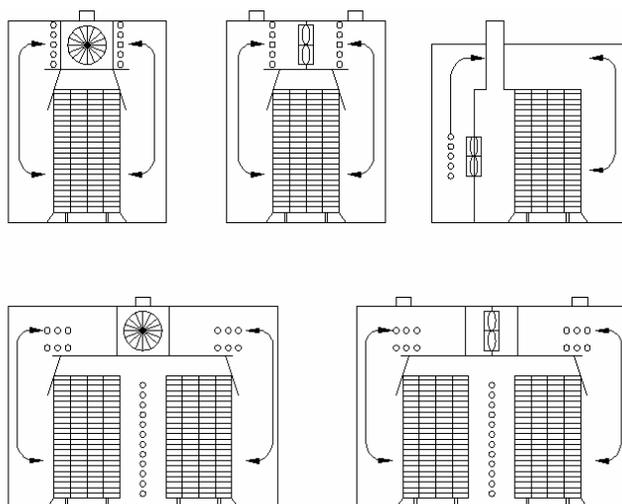


Figura 18. Alternativas en la distribución del sistema de calefacción y circulación del aire en una cámara

5.2 Sistema de circulación del aire

5.2.1 Velocidad de circulación del aire

Como se indicó en el inciso 4.3.2, la velocidad del aire y su caudal se reflejan directamente en el tiempo de calentamiento de la madera y en el consumo de energía eléctrica de los motores de los ventiladores. Establecida la velocidad de circulación de ± 2.5 m/s, el caudal de aire que requieren mover los ventiladores se estima tomando en cuenta dicha velocidad y el área transversal de los huecos por los que debe circular el aire a través de la carga de madera; en una estufa de secado dicha área está representada por el largo de la cámara y la suma de todas las separaciones o huecos verticales que conforman la pila de madera (si se tratase de madera aserrada dichos huecos corresponden al espesor de los separadores).

5.2.2 Tipos de ventiladores

Para la circulación del aire en el interior de una cámara de secado o de tratamiento térmico se emplean ventiladores de tipo axial que inducen al aire a circular a través de la madera o las tarimas apiladas, transfiriendo el calor desde los intercambiadores o ductos hasta la madera para que ésta eleve su temperatura. Para la recirculación del aire dentro de la cámara, los ventiladores axiales pueden hacerse funcionar con un motor acoplado a cada ventilador, Figura 19, o bien, montados sobre una sola flecha con motor general externo, Figura 20.

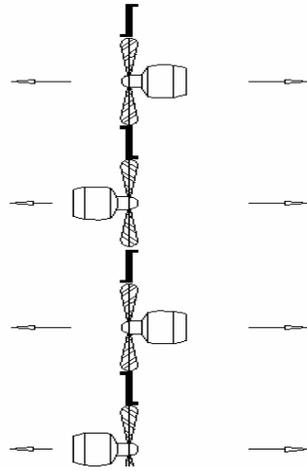


Figura 19. Ventiladores axiales con motor individual acoplado dentro de la cámara

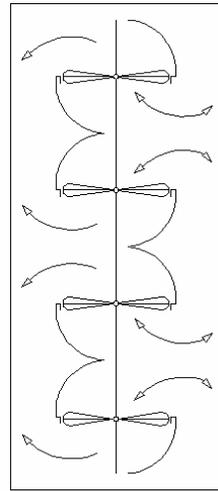


Figura 20. Ventiladores axiales en una flecha con motor general en el exterior de la cámara

Es importante indicar que para esta aplicación los ventiladores deben ser de aluminio o una aleación resistente a la corrosión, fenómeno normal que tiende a presentarse en estos equipos por las altas temperaturas, humedad y ácidos volátiles que desprende la madera.

Cuando las cámaras de tratamiento térmico son del tipo de combustión directa con quemadores de gas, en los ductos de alimentación de los gases de combustión generalmente se usan ventiladores centrífugos, y en el interior de la cámara, para la recirculación del aire, se usan ventiladores axiales, Figura 21.

5.2.3 Desviadores y plafón

Además de asegurarse una buena velocidad de circulación, se debe cuidar que dicha circulación sea uniforme y constante en toda la cámara para lograr precisamente una uniformidad de calentamiento en todas y cada una de las tarimas o embalajes que se encuentren en tratamiento, desde el piso hasta el techo y desde el frente hasta el fondo de la cámara.

Para lograr una distribución uniforme y correcta, se debe considerar la colocación y diseño adecuado de láminas denominadas “desviadores”, los cuales tienen como función hacer conducir el aire caliente en determinada dirección a través de la carga, evitar retrocesos alrededor de los ventiladores y hacer su distribución homogénea, Figuras 18 y 22.

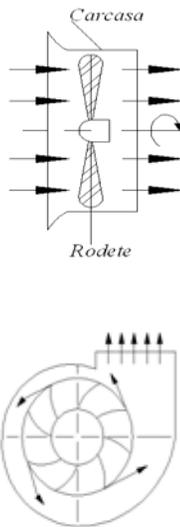


Figura 21. Ventilador axial (superior) y centrífugo (inferior)



Figura 22. Cámara de secado con plafón central y desviadores colgantes laterales. (Foto: M. Fuentes)

5.3 Sistema de humidificación

Para las cámaras de estufas de secado el sistema de humidificación es obligado para poder obtener un buen proceso de secado, es decir, tiempo reducido, alta productividad y, sobre todo, buena calidad de madera secada. En el caso de las cámaras para aplicación del tratamiento térmico establecido en la NOM-144-SEMARNAT-2004, no es indispensable el contar con tal sistema para llevar el proceso, aunque si aconsejable debido al efecto que tiene la humedad relativa del aire de calefacción en el tiempo de calentamiento y la protección de la madera respecto a grietas, colapso y apanamiento (ver apartado 4.2.6).

En el caso de una estufa de secado el sistema de humidificación tiene doble propósito; funciona cuando se requiere aumentar la humedad relativa del aire, ya sea inyectando directamente vapor no saturado o bien agua atomizada a presión, y también es el encargado de reducir la humedad relativa del aire mediante la apertura de ventilas en la cámara cuando así se requiere.

Cuando se alimenta vapor a la cámara, se cuenta con un tubo perforado, llamado humidificador, cuyo vapor proviene directamente de la caldera o equipo vaporizador. Cuando el sistema de calefacción no es una caldera de vapor, se hace uso de agua bombeada a presión a través de una tubería también, cuyas salidas están provistas de ranuras o boquillas para la salida del agua en forma de pequeñas partículas, capaces de ser suspendidas en la corriente de aire para su humidificación y distribución.

Conforme la madera en el interior de la cámara se va secando, el agua que sale de la madera, en forma de vapor, va incrementando la humedad relativa del aire y puede llegar a reducir o incluso detener el proceso de secado, aunque la temperatura sea alta; en el caso del tratamiento térmico, como ya se ha indicado, si el aire está saturado no permitirá la evaporación del agua de la madera y, por lo tanto, el enfriamiento de la misma, lográndose un mejor efecto y menor tiempo de calentamiento.

Considerando lo anterior, el sistema de humidificación en una cámara de secado lo constituyen el humidificador, para aumentar la humedad relativa y las ventilas para disminuirla. Figuras 29 y 33.

5.4 Sistema de control y registro

5.4.1 Controlador registrador de la cámara

Las cámaras de secado o de tratamiento térmico del tipo convencional normal pueden presentar entre sí características muy variadas, considerando además la calidad de la instalación, formas de operación y de control de proceso, entre otros aspectos.

El control de la operación de estas cámaras se puede realizar a través de sistemas manuales, semi-automáticos y automáticos. Los programas de calentamiento o secado

Figura 23. Sistema computarizado para control y registro de variables en la cámara de tratamiento.



a utilizar dependen principalmente de la especie de madera a tratar seguido por el tipo de cámara, sus capacidades instaladas de calefacción y de ventilación y la disponibilidad energética de la planta.

Para el caso del tratamiento térmico establecido en la NOM-144-SEMARNAT-2004, debe considerarse que aunque este proceso no requiere tantas etapas como las que demanda el secado, si es conveniente tomar en cuenta la versatilidad de la cámara como para que permita también llevar a cabo procesos de secado de maderas, sobre todo por el costo de inversión que ellas representan.

El control de proceso en esta tecnología es fundamental para asegurar una buena calidad, reducción de tiempo y de costos. Varias de ellas cuentan con sofisticados sistemas electrónicos de control basados en el uso de controladores lógicos de proceso (PLC) individuales para cada cámara, que son operados directamente desde una computadora, Figura 23, que recibe las señales de control y las mediciones adicionales de humedad de madera, tiempo, consumos de energía, dirección de flujo de aire y otras variables de interés; para finalmente entregar los reportes del proceso y generar gráficos con los resultados de los programas de secado o del tratamiento térmico.

El principal inconveniente de esta alternativa es el costo de inversión, ya que sobrepasa notoriamente el costo de un registrador-controlador semiautomático de operación neumática y el de un termógrafo eléctrico con termocuplas.

Los sistemas para controlar las variables de temperatura de calefacción y humedad relativa del aire, en la mayoría de las estufas de secado que tienen ya varios años en operación en México, utilizan aparatos de control y registro denominados "semiautomáticos", de operación neumática o eléctrica. Dichos aparatos controladores, como el mostrado en la Figura 24, cuentan con un psicrómetro (bulbo seco y bulbo húmedo) para monitorear y evaluar la temperatura y humedad relativa del aire en el interior de la cámara.

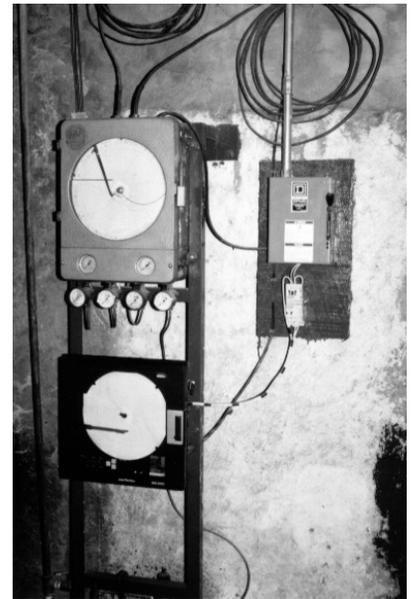


Figura 24. Aparato controlador registrador MOORE (superior), y termógrafo (inferior)

Las condiciones de dicho aire las establece el operador de la estufa directamente en el aparato y, de acuerdo a los parámetros establecidos en los programas (secuelas), mediante válvulas de diafragma de acción neumática el aparato permite su apertura o cierre, ya sea para el paso de fluido para elevar la temperatura en los intercambiadores de calor, ya sea para permitir el paso de vapor directo o agua a la cámara para la elevación de la humedad relativa en el interior, o bien, para abrir las ventilas e intercambiar y reducir la humedad del aire.

Este tipo de aparatos de control y registro semiautomático permite hacer modificaciones al programa de tratamiento térmico o secado fácil y directamente, y también permite graficar las condiciones del aire secante, aunque no precisamente el contenido de humedad y temperatura de la madera, variables que deben medirse por separado, ya sea por el método de pesadas o por medio del xilohigrómetro eléctrico en el caso del contenido de humedad y por medio de los termógrafos y termocuplas para el caso de la temperatura de la madera, estas últimas previstas en la NOM-144-SEMARNAT-2004, Figuras 24, 25 y 26.

5.4.2 Sensor-graficador de la temperatura en la madera



Figura 25. Termógrafo con dos plumas para dos sensores.

(Fuente: Catálogo PARTLOW®)

Para el cumplimiento del tratamiento térmico establecido en la NOM-144-SEMARNAT-2004, lo más importante es el registro de la temperatura en el interior de la madera a la magnitud y el tiempo estipulados; para ello se debe contar con un equipo de evaluación y registro de tales variables, aparte del correspondiente al control del proceso de la cámara.

En las cámaras de tratamiento térmico de control manual o semiautomático, se pueden incorporar termógrafos con sensores termocuplas. Dichos termógrafos los hay análogos y digitales, los cuales pueden graficar las temperaturas de una o dos termocuplas en períodos de 8 h, 12 h, 24 h ó 7 días, (en este caso se recomienda que sea máximo de 24 h).

En algunas empresas se tienen para el registro termógrafos Partlow MRC5000®, con dos plumillas para dos termopares permitiendo un adecuado

registro, Figura 25, aunque también hay en el mercado Taylor®, Foxboro®, Honeywell® y Dickson®, entre otras marcas igualmente disponibles.

Los sensores termocuplas se recomienda que sean del “tipo J”, de 3” a 4” de longitud y 3/16” de diámetro, con forro impermeable en todo el cable, Figura 26. En el caso de estufas de secado con control automático a través de PLC, se tienen por parte de los mismos proveedores del equipo, programas o software para computadora que, con la computadora y la incorporación de las correspondientes termocuplas, permiten llevar a cabo el control, registro y graficación de las condiciones del tratamiento térmico de una manera totalmente computarizada, Figura 23, lo que les da como característica el ser procesos de control altamente versátiles y precisos, pudiendo almacenar los datos, registrar los valores numéricos y graficar las variables en una impresora, aunque con un precio superior a los termógrafos anteriores.



Figura 26. Termocupla (sensor) para medir la temperatura en la madera.

5.4.3 Colocación de los sensores en el embalaje

No hay que olvidar que la NOM-144-SEMARNAT-2004, para el tratamiento térmico del embalaje de madera exige que la temperatura se mida en el centro de la pieza de madera, para ello, las termocuplas tienen la característica de que la parte sensible a la temperatura se ubica solamente en el extremo del sensor, mismo que debe introducirse a la madera en dirección perpendicular a la fibra en un barreno hecho previamente con un taladro y broca de un diámetro igual o ligeramente mayor al del sensor.

Las piezas de madera a las cuales se les debe colocar la termocupla (dos) deben ser las más gruesas, solo así se asegura que toda la madera del embalaje alcance la temperatura de los 56 °C. Dicha colocación no debe hacerse en los extremos respecto al largo de los barrotes, sino a un tercio de su longitud por lo menos.

5.5 Sistema de carga y descarga

Para el aspecto de productividad, reducción de costos de mano de obra y rendimiento, es muy importante determinar el sistema que se utilizará para realizar las operaciones de carga y descarga del embalaje en la cámara de tratamiento térmico o secador. En este sentido pueden considerarse las siguientes tres alternativas:

- Manual
- Cargador frontal (montacargas)
- Con plataformas rodantes en rieles

El procedimiento que menos inversión inicial requiere pero que resulta ser el menos práctico es obviamente el manual, donde toda la labor recae en el esfuerzo directo de los obreros. Esa alternativa solamente se justificaría para producciones pequeñas e intermitentes, pues, por el tiempo que se invertiría en estas operaciones se estaría subocupando la cámara de tratamiento, afectando directamente en los costos de operación.



Figura 27. Cargador frontal (montacargas) para movimiento del embalaje

El uso de cargadores frontales, Figuras 27 y 30, es una alternativa adecuada para cuando se dispone de poco espacio en la planta, se manejan volúmenes importantes de embalajes o existe una distancia significativa entre la planta de fabricación y la cámara de tratamiento. Es una opción versátil ya que permite acomodar de manera variable la carga dentro de la cámara.

Para el caso de plataformas rodantes, Figura 28, su principal cualidad es el reducido tiempo que requiere para realizar

la carga y la descarga de la cámara, dado que el armado o desarmado de los paquetes o pilas se hace fuera de la cámara y con ello se evitan tiempos muertos como el enfriamiento del equipo, aspectos que se reflejan positivamente en la productividad y un ahorro de energía. Su limitante es la necesidad de contar con espacio suficiente frente a la cámara, ya sea para el movimiento de las mismas plataformas como para el almacenamiento aledaño del producto. Actualmente existen modelos de cámaras de tratamiento térmico “desplazables”, es decir, los embalajes se apilan en un extremo fuera de la cámara y ésta, a través de rieles, se desliza para cubrir la carga y hacer el tratamiento, mientras que en el lugar original de la cámara se retira el embalaje tratado y se apila una nueva carga, reduciéndose así los tiempos de carga y descarga.

Cualquiera que sea la alternativa, el sistema de carga y descarga debe considerarse desde que se planea el tipo de cámara de tratamiento a instalar, ya que en cada caso puede ser diferente el diseño y ubicación de la puerta de carga y demás instalaciones.

Es importante tomar en cuenta que la carga de embalajes no se debe “pegar” a los muros por donde circulará el aire para no obstruir con ello el proceso de calentamiento.

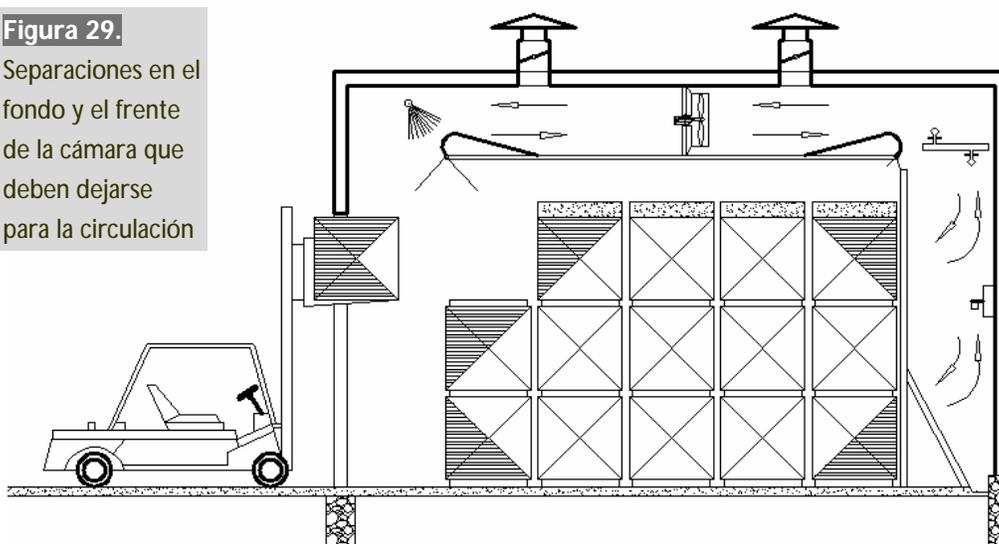
La separación entre la pila de embalajes y los muros de la cámara en las partes por donde “entra” el aire a la pila, oscila entre los 90 y 120 cm, dependiendo de la altura interna de la cámara, de los huecos verticales entre la carga (espesor de las tarimas por ejemplo) y de la separación entre el plafón y los muros. Figura 29.



Figura 28. Sistema de carga y descarga en plataformas rodantes

Figura 29.

Separaciones en el fondo y el frente de la cámara que deben dejarse para la circulación



5.6 Cámaras de Tratamiento Térmico

5.6.1 Requerimientos de espacio interno y externo

La forma y diseño de las cámaras que se emplean en la industria maderera para el secado de la madera pueden perfectamente utilizarse para el tratamiento térmico de esterilización de los embalajes de madera. La forma física de estas cámaras y sus capacidades térmica y de ventilación, dependen del tipo de tecnología a utilizar, que para estos efectos se clasifican en secador convencional normal y secador de combustión directa. El secador convencional normal corresponde a la tecnología clásica de secado, desarrollada y utilizada a nivel mundial para el secado artificial de todo tipo de madera aserrada. Las cámaras usadas son, desde el punto de vista geométrico, muy variadas según como ingresa la madera al sector y a su disposición interna. De esta forma se pueden clasificar las cámaras en:

- Tipo compartimiento de carga lateral mediante cargador frontal de horquilla para 4 ó más paquetes de madera en el ancho y hasta 4 en altura, con capacidad de hasta 200 m³ de madera, según el número de paquetes a distribuir hacia los lados, Figuras 29 y 30.

- Tipo túnel de 2 vías cargada mediante plataformas rodantes con ancho de madera hasta 3.0 m por plataforma y largos de hasta 16 m. La capacidad máxima en doble vía puede alcanzar hasta los 200 m³ en madera aserrada, Figuras 15 y 22.
- Tipo túnel de 1 vía cargada mediante plataformas similar al anterior, con capacidad máxima de carga de 120 m³.

Figura 30. Cámara de tratamiento térmico y secado tipo compartimento, para carga lateral con montacargas.



5.6.2 Sistemas constructivos. Materiales y diseños

El tipo de construcción empleada en este tipo de cámaras es muy variado y lo más común es:

- Paneles de aluminio con estructura metálica, Figuras 16 y 22.
- Albañilería, Figura 31.

Las cámaras construidas en aluminio generalmente son importadas y las de otro tipo de construcción son de origen nacional. En el caso de cámaras de estructura metálica, los muros deben ser de paneles de aluminio para soportar tanto el intemperismo exterior como las condiciones corrosivas del interior. Además, deben tener un buen material aislante interno para evitar las pérdidas de calor; la fibra mineral o de vidrio son de los materiales más utilizados para este efecto, además de tomar en cuenta el espesor y hermeticidad de las uniones para evitar fugas.

Hay alternativas donde el proveedor suministra todos los accesorios operativos y solamente la cámara es construida por el cliente. En este caso pueden construirse con tabique refractario, con doble muro para dejar una cámara aislante de aire intermedia y, muy importante, siguiendo las especificaciones y planos que debe proporcionar el fabricante del equipo, Figura 31.

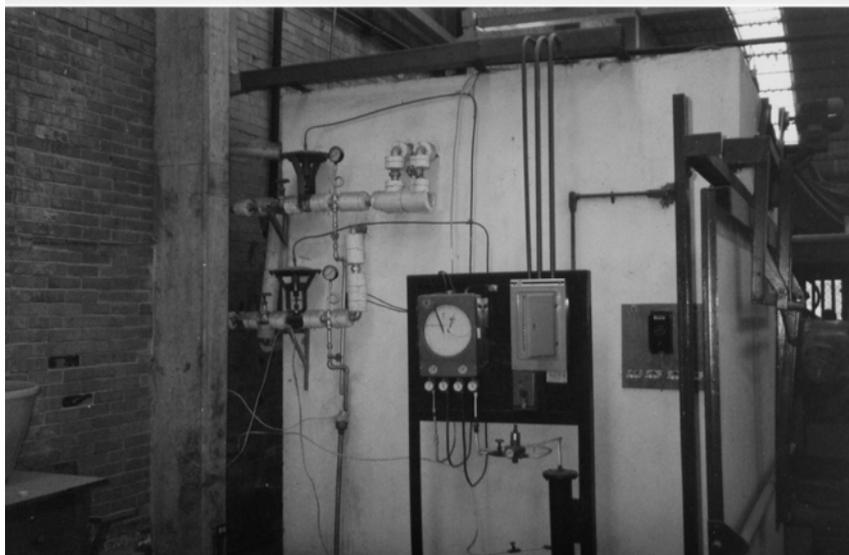


Figura 31. Cámara de secado y tratamiento térmico de mampostería.

Analizando cada una de las partes que constituyen una cámara de tratamiento térmico o secado, se destacan los siguientes aspectos:

Cimentación. Debe soportar la estructura de la cámara, el peso de los ventiladores, de los intercambiadores de calor y de todos los accesorios, además del piso y la madera misma. Se recomienda hacer una evaluación de la mecánica del suelo previamente a su construcción para evitar hundimientos, desniveles, fracturas y problemas de humedad.

Piso. Debe ser lo suficientemente grueso y resistente para soportar el peso de la madera, plataformas rodantes y golpes y vibraciones que se produzcan durante la operación. Debe instalarse una barrera de vapor para evitar la humedad de la tierra, una ligera pendiente y hacerse una adecuada compactación del terreno previamente.

Paredes. Pueden ser de ladrillo cocido, paneles de aluminio e inclusive de adobe o madera, aunque estos dos últimos no son muy usados por su baja resistencia mecánica y al intemperismo. Ya se indicó que la primera demanda en los muros es el adecuado aislamiento térmico. Cuando los muros son de ladrillo cocido se debe construir de doble muro, dejando una separación intermedia de 5 a 15 cm, lo que les proporciona un buen aislamiento térmico. En este caso, la pared interior debe protegerse con un buen impermeabilizante para prolongar la vida útil de los muros. Figura 32.

Figura 32. Cámaras de tratamiento, con impermeabilizante en muros interiores y puerta accionada mediante gato mecánico.



Techo. Esta es una de las partes más costosas de la cámara, si se fabrica de losa de concreto debe considerarse en la mezcla que ésta sea ligera y aislante pero resistente, tanto para soportar los posibles implementos estructurales, las vibraciones de los ventiladores y la dilatación y condensación de humedad por las condiciones naturales de operación.

En las cámaras de paneles de aluminio como en algunas de ladrillo, el techo puede ser también de paneles de aluminio con aislamiento, lo que les da ligereza y resistencia a la vez, Figura 33. Cuando se trata de cámaras de secado de madera, en el techo se acostumbra instalar las ventilas para el intercambio de aire hacia y del exterior; en este caso debe tomarse en cuenta el número y ubicación de los ventiladores del sistema de ventilación o circulación.

Igualmente, cuando los ductos de calefacción o intercambiadores de calor (tubos aletados) y ventiladores se ubican en la parte superior de la cámara, debe instalarse un “falso techo” o plafón, el cual tiene la finalidad de separar el espacio destinado a los ventiladores, con el objetivo de conducir el aire de calefacción a todo lo ancho de la cámara. Este plafón se prolonga a todo lo largo; su ancho generalmente corresponde al ancho de la carga de madera colocada, misma que debe separarse de los muros laterales para permitir el descenso y ascenso del aire de calefacción que entra y sale de las mismas pilas de madera. La separación entre el techo y el falso techo está regido por el diámetro de los ventiladores y, si no es de un material resistente a la corrosión debe recubrirse de una pintura o impermeabilizante adecuados, Figuras 10, 15 y 22.

Pasillos laterales. No toda la superficie interna de una cámara de secado o de tratamiento térmico está disponible para colocar madera. Dependiendo de la dirección de circulación del aire deben dejarse espacios entre la madera y los muros para que circule el aire entrante y saliente de las pilas hasta donde se encuentran los intercambiadores de calor, ventiladores (y ventilas, en su caso). El ancho de dichas separaciones o pasillos depende de la altura de las pilas de embalaje, de la separación vertical entre piezas (tarimas, cajas, etc.) y de la velocidad del aire. Como referencia, para cámaras que tienen una altura de carga de 3.60 m, los pasillos son de ± 1.20 m. Figuras 16 y 29.

Puertas. Cuando se utiliza un cargador frontal (montacargas), la puerta es más grande y propiamente viene a constituir uno de los muros laterales. En el caso de usar plataformas rodantes las puertas van en uno o en los dos extremos de la cámara. Deben estar diseñadas para abrirse con facilidad, sin mucho esfuerzo, bien aisladas térmicamente y resistentes a la corrosión. Hay varias alternativas a considerar, siendo las más comunes las de tipo corredizo para cámaras grandes y de bisagra solo para cámaras pequeñas, Figura 32.

Ventilas. Cuando la cámara de tratamiento térmico también funciona como estufa de secado de madera es indispensable contar

con ventilas para intercambiar el aire húmedo del interior, por aire seco del exterior de la cámara, que es como se reduce la humedad relativa del aire secante en la mayoría de las estufas de secado. Estas ventilas pueden ubicarse sobre el techo o en la parte superior de los muros, dependiendo del diseño y, sobre todo, de la colocación de los ventiladores. Normalmente se instalan en pares y se abren y cierran mediante un dispositivo que esta conectado al aparato de control, sea este semiautomático o automático, que regula, además de la temperatura, la humedad relativa del aire de calefacción, Figuras 29 y 33.

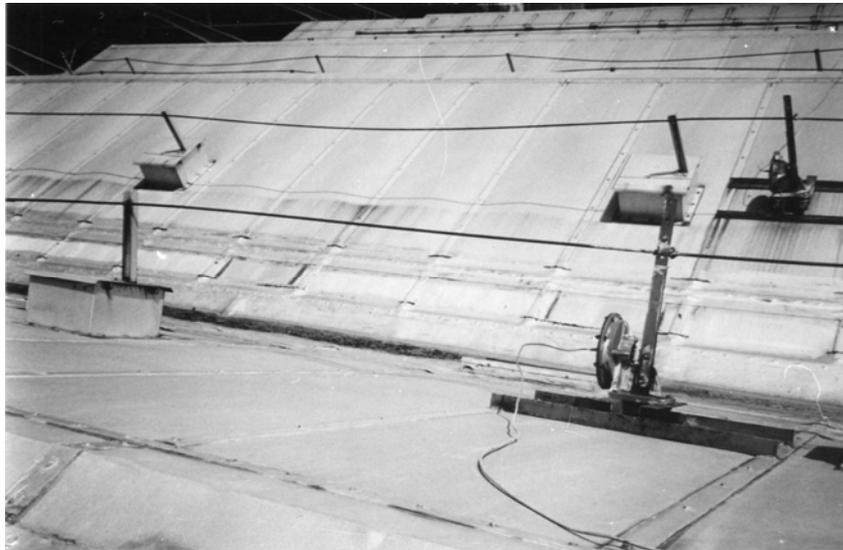


Figura 33. Techos a dos aguas de cámaras de secado. Las ventilas son operadas mediante palancas y motor neumático o eléctrico para intercambio de aire en los procesos de secado



PROGRAMAS DE APLICACIÓN DEL TRATAMIENTO TÉRMICO AL EMBALAJE DE MADERA.

Antes de hacer indicaciones específicas sobre el programa —niveles de temperatura, humedad relativa, tiempo y ventilación—, que se deben aplicar para el tratamiento térmico, es necesario recordar y tener en mente varios de los aspectos citados en este documento, desde las mismas especificaciones que establece la NOM-144-SEMARNAT-2004, hasta la influencia que pueden tener las variables del proceso y tipo de embalaje que se trate.

La NOM-144-SEMARNAT-2004, establece como tratamiento térmico la aplicación de una temperatura de 56°C en el centro de las piezas de madera del embalaje y mantenerla durante un tiempo mínimo de 30 minutos. El tiempo requerido para alcanzar esta temperatura, como se comentó, va a estar influenciado por: el espesor de la madera; la especie de madera; el contenido de humedad de la madera; la temperatura inicial que tenga la madera; la temperatura de calefacción; la humedad relativa del aire, la velocidad y el caudal del aire de calefacción, el aislamiento térmico de la cámara; la capacidad energética del sistema de calefacción, además de otras variables operativas como puede ser el tipo de apilado, el volumen de madera de la carga y el mismo manejo que se tenga del programa de tratamiento térmico.

Cuando se trata de calentar la madera, el calor se puede transmitir por radiación, convección o por conducción; si se considera que en todas las cámaras el sistema de calefacción se realiza utilizando aire como medio de calentamiento, la transmisión del calor del sistema hacia la madera será por “convección”. Sin embargo, para que ese calor sea “tomado” por la madera, es necesario que exista un gradiente de temperatura del exterior hacia el interior de la misma, es decir, que la temperatura del exterior debe ser superior a la del interior de la madera para que se pueda dar la difusión del calor hacia el

centro, de otra forma, no habría dicha difusión o conducción de calor dentro de la madera.

Mientras la temperatura del aire de calefacción sea superior a la temperatura de la madera, habrá calentamiento de ésta. Si la temperatura final que se debe alcanzar en el centro es de 56°C, entonces necesariamente la temperatura del aire de calefacción debe ser superior a dicha magnitud.

Respecto a la temperatura inicial de la madera, dependiendo de la época del año, de la zona geográfica y de las condiciones de almacenamiento del embalaje, la temperatura inicial que tiene la madera puede oscilar entre los 6°C y 20°C.

Por otro lado, la temperatura inicial o de la primera etapa que se aplica a la madera en los procesos generales de secado, se mencionó que para madera de pino varía entre los 65°C y 75°C, con una media de 70°C, misma que se usa con un aire saturado para la etapa previa precisamente de calentamiento de la madera a secar. Una vez que se ha pasado la etapa de calentamiento en los procesos de secado, dicha temperatura se eleva en etapas posteriores pudiendo llegar inclusive hasta los 90°C para ciertos tipos de maderas en las últimas etapas.

Tomado entonces dichas referencias, se puede decir que el ascenso de temperatura que se va a manifestar en la madera durante el tratamiento va, de la temperatura inicial (6°C a 20°C) hasta los 56°C, lo que representa un rango teórico de variación de temperatura de 50°C a 36°C. Así mismo, se deduce de los programas de secado, que para alcanzar dicha temperatura en la madera, (56°C), la temperatura del aire de calefacción es recomendable que se establezca constante en **70°C**.

6.1 En cámaras de calefacción directa con quemadores de gas

Tomando en consideración lo indicado previamente, hay que tomar en cuenta también que la humedad relativa del aire tiene una importante influencia en la rapidez con que se pueda calentar una madera (ver incisos 5.1 y 5.3). Como en las cámaras de calefacción directa no se cuenta en varios de los casos con un

sistema de humidificación integrado, el calentamiento de la madera debe hacerse en etapas graduales respecto a la temperatura del aire de calefacción.

Por la baja conductividad térmica de la madera, se recomienda aplicar una calefacción gradualmente ascendente en niveles de 20°C de diferencia de temperatura entre la temperatura de la madera y la temperatura del aire de calefacción, partiendo de una temperatura mínima inicial de calefacción de 50°C, hasta llegar a la temperatura máxima límite de los 70°C recomendados. Ver Cuadro 4.

Cuadro 4.

Programa de calentamiento recomendado para sistemas de calefacción directa sin sistemas de humidificación

Etapa N°	Temperatura de la madera (°C)	Temperatura de calefacción (°C)	Tiempo (min)
1	< 20	50	Variable
2	20	50	Variable
3	25	50	Variable
4	30	50	Variable
5	35	55	Variable
6	40	60	Variable
7	45	65	Variable
8	50	70	Variable
9	56	70	30

En todo caso se deben mantener cerradas las ventilas para evitar la pérdida de aire caliente y de la poca humedad que genere la madera al aire del interior de la cámara.

6.2 En cámaras de calefacción indirecta con caldera de vapor, agua caliente o aceite diatérmico y sistema de humidificación

Cuando se trata de una cámara de tratamiento térmico provista de sistema para humedecer el aire del interior de la cámara o con una estufa de secado del tipo convencional, es aconsejable aprovechar este sistema para acelerar el

tiempo de calentamiento sin exponer la madera a colapso, agrietamiento o apanamiento.

En los apartados 5.1 y 5.3 se explicaron las ventajas que tiene el calentar la madera bajo un ambiente lo más húmedo posible, la mayor difusión del vapor de agua en comparación con el aire seco, el impedir que se evapore el agua de la madera y con ello se provoque su enfriamiento con el consecuente retraso de tiempo, además el evitar el factor que causa las contracciones y posibles agrietamientos —el secado severo—, hacen que sea más ventajoso aplicar el tratamiento térmico de la madera con una elevada humedad relativa (en los equipos con controladores tradicionales representa una reducida depresión del bulbo húmedo (DBH)), a que si se aplicara un aire seco. Ver Figura 9.

Así, para el caso de cámaras con sistema de humidificación se puede aplicar directamente la temperatura recomendada de 70°C desde un inicio del proceso y, muy convenientemente, una humedad relativa (HR) cercana a la saturación (95%), o bien, aplicar una primera etapa a una temperatura intermedia de 60°C durante una hora, con alta humedad relativa siempre, y posteriormente elevar la temperatura a los 70 °C hasta alcanzar los 56 °C en la madera y mantenerla los 30 minutos que indica la NOM-144-SEMARNAT-2004, Cuadros 5 y 6.

Cuadro 5.

Programa de tratamiento para cámaras con sistema de calefacción y sistema de humidificación

Etapa N°	Temperatura de la madera (°C)	Temperatura del aire de calefacción (°C)	Humedad relativa del aire (%)	Tiempo (min)
1	< 56 a 56	70	>95	Variable
2	56	70	70	30

Una vez que se alcanzan los 56°C al centro de las tablas del embalaje no es necesario mantener alta humedad relativa durante el período de los 30 minutos de calentamiento, de hecho es recomendable bajar la humedad relativa por economía y para favorecer un parcial secado de la madera, sin ser esto último el objetivo principal. Una disminución de la humedad relativa al 70 % se puede tomar como adecuada.

Cuadro 6.

Programa alternativo de tratamiento para cámaras con sistema de calefacción y sistema de humidificación

Etapa N°	Temperatura de la madera (°C)	Temperatura del aire de calefacción (°C)	Humedad relativa del aire (%)	Tiempo (min)
1	< 40 a 40	60	>95	Variable
2	40 a 56	70	>95	Variable
3	56	70	70	30

De acuerdo a la experiencia, bajo estas condiciones se ha logrado llegar a la temperatura de los 56°C en barros de 8.90 cm (3 ½") de espesor, de madera de pino, en períodos de 2 a 3 horas, tiempos cuya variación depende, como se ha explicado, del contenido de humedad de la madera, de su densidad, de la circulación del aire, del diseño de la cámara, etc, etc. Lo anterior también dependerá de la capacidad térmica del equipo generador del calor (capacidad de la caldera o quemador de aceite diatérmico), pues por ejemplo, en el caso de calderas generadoras de vapor, para el proceso de calentamiento con humedad del aire elevada, se demanda tanto una cantidad de vapor para la calefacción como otra equivalente para la humidificación del aire.

Cabe mencionar que en algunos casos los compradores de embalajes de madera, además de solicitar el tratamiento térmico solicitan que también se seque la madera en el mismo proceso. Esta alternativa no debe entenderse en el sentido de que entonces no es necesario humedecer el aire de calefacción como se ha indicado; aun para estos casos, antes de secar la madera es necesario inicialmente calentarla hasta la temperatura de la primera etapa de secado antes de que se inicie la evaporación del agua de la madera, y esto solo puede lograrse —el calentamiento—, bajo una atmósfera saturada,. Una vez calentada la madera se puede con seguridad proseguir con la disminución de la humedad relativa del aire (apertura de ventilas) según lo indique el programa de secado respectivo.

ESTIMACIÓN DE COSTOS DE CÁMARAS, EQUIPOS Y PROCESO DE TRATAMIENTO TÉRMICO

7.1 Factores a considerar

Es difícil determinar con precisión el costo del proceso de tratamiento térmico, aún para casos donde se relacionan un mismo tipo de embalaje, una misma especie de madera o una misma marca de cámara de tratamiento, ya que sobre estos tiene una significativa incidencia el costo fijo por concepto de operación de la planta térmica, de los secadores o cámaras y de las actividades colaterales que también realizan, ya sea los trabajadores y/o el equipo operativo (montacargas, caldera, administración, etc). Luego, si una planta térmica genera vapor para satisfacer varios requerimientos en una industria, este costo es marginal en el secado, y por otro lado, hay que tomar en cuenta el volumen de madera o embalajes que entran al proceso, la densidad básica de la madera, el espesor de la madera, el contenido de humedad que presenta, la temperatura de calentamiento que se esté aplicando, así como si se aplica o no vapor o agua atomizada para controlar la humedad relativa en el interior.

Los niveles de inversión y costos de operación de una planta para el tratamiento térmico dependen de los siguientes aspectos generales:

- Capacidad de carga considerada en m³ y N° de tarimas, por ejemplo.
- Sistema de calefacción de la cámara
- Tipo de combustible para la caldera o calefacción
- Capacidad de la caldera y grado de automatización
- Equipo para carga y descarga

Los costos del tratamiento dependen principalmente de los costos fijos relacionados con la mano de obra directa del personal de operación de la

planta térmica y de la cámara de tratamiento térmico. En menor grado, los costos variables dependen también de la producción mensual. La inversión total también depende de la capacidad de la planta, ya que los costos de instalación serán marginalmente mayores en la medida que la planta tenga una baja producción.

7.2 Costos de inversión

Determinar los niveles de inversión de una planta de secado o tratamiento térmico, significa efectuar una evaluación precisa de los costos de equipo, de las instalaciones y montaje, obras civiles, equipos complementarios y otros costos de implementaciones —en algunas marcas y proveedores se cobran los servicios del técnico especializado en el montaje que por lo regular proviene de otra localidad, Un detalle de estos se puede desglosar en:

- Cámaras de secado (costo equipo)
- Planta térmica (costo equipo)
- Instalaciones: Obras civiles, edificios, redes de fluidos, acometidas eléctricas, acometidas de agua, carros, otras obras menores.
- Silo del combustible, sistema de alimentación del combustible.
- Cargador frontal o montacargas
- Implementaciones varias e imprevistos.

El costo de inversión de una cámara de secado o de tratamiento térmico depende del tipo de técnica que se utilice y el grado de tecnología y de automatización de ésta. Como referencia es posible señalar que los costos de cámaras importadas construidas a base de paneles de aluminio y sistema automático de control, los precios oscilan entre los 40 000 y 150 000 US Dls., dependiendo de la capacidad y si se trata solamente de una cámara de tratamiento térmico fitosanitario o de una completa estufa de secado.

Los valores finales son dependientes del tamaño de la cámara de secado y de la cantidad de ellas a adquirir, ya que los sistemas de control y generadores de calor actuales permiten operar en forma simultánea un gran número de cámaras y, en tal caso, los costos son menores.

En cuanto a las plantas térmicas (caldera, quemador de aceite térmico o quemador de gas), sus costos de inversión también pueden ser muy variables dependiendo de:

- Producción de vapor y su presión, o bien de agua caliente
- Presiones de trabajo.
- Grado de automatización operacional.
- Tipo y tecnología del hogar para combustibles sólido, líquido o gas
- Origen de la planta térmica, (nacional o importada).

En este caso las variaciones de precio son significativas, dependiendo de la marca y origen de estos equipos. A modo de referencia, los costos de plantas térmicas sin considerar los silos de almacenamiento de combustible, los sistemas de alimentación y otros equipos auxiliares, se sitúan entre 45.00 y 65.00 US Dls./Ton/h de vapor.

7.3 Costos del tratamiento térmico

La evaluación de los costos del tratamiento térmico que pueda presentar la industria no siempre se realiza con exactitud, ya que varios de ellos se ocultan en la operación de la planta completa, (aserrío y elaboración), y marginalmente repercuten en la operación de la planta de secado o tratamiento.

El tipo de embalaje a tratar y la producción mensual de una planta son variables importantes en la determinación de los costos. Una industria que realice actividades de aserrío, elaboración y tratamiento térmico o secado con el fin de obtener productos con valor agregado, normalmente considera dentro de su estructura de costos los siguientes parámetros:

a) Costos fijos

- Costo en personal de operación tanto de la planta térmica y de las cámaras de secado, además de la respectiva supervisión de tiempo parcial.

b) Costos variables

- Mano de obra para la preparación de las cargas de madera (tarimas, plataformas, cajas, etc) y su respectiva descarga.

- Costo de energía eléctrica tanto de los secadores como de la planta térmica (caldera o quemador).
- Costo de combustible (costo interno de la planta).
- Costos de operación de la caldera.
- Costo por uso de cargador frontal (marginal por uso dentro de la planta).
- Costos de mantenimiento.
- Otros costos menores.

En el caso que una empresa se dedique sólo a la actividad de secado o tratamiento térmico fitosanitario como una prestación de servicios a terceros, debe considerar adicionalmente a los costos anteriores:

- Costos fijos en personal de administración, vigilancia y otros.
- Costos variables de insumos administrativos.
- Costo de arriendo de terrenos, potencia eléctrica instalada, agua, teléfono y otros.
- Costo del combustible considerando valor real puesto en planta.
- Costo de cargador considerando valor real para propósitos de la planta de secado o tratamiento térmico.
- Costo de mantenimiento real.
- Otros costos menores.

De acuerdo a los antecedentes presentados, es posible inferir que los costos del tratamiento térmico no siempre representan los valores reales en que incurre una empresa para efectuar dicha operación y existe una cantidad no despreciable de costos ocultos o amortizados en la operación completa de la planta cuando sus actividades comprenden otras operaciones. Estos costos reducen en la medida que, por ejemplo, se considere un menor precio al combustible, si este se encuentra disponible en la planta y por otro lado, se utilicen recursos existentes en la planta.

Aparte, si se considera que existen más de 35 modelos tan solo de tarimas, y de las cuales el tamaño y volumen de madera igualmente es variable –8 a 22 pies tabla por tarima-, Figura 34, sería impráctico establecer aquí un costo unitario por el proceso de tratamiento. Aún así, únicamente como referencia se tiene que algunos productores consultados consideran que sus costos de tratamiento oscilan entre \$ 0.20 y \$ 0.50 por pie tabla en tarima (2004), de manera que, si tomamos como referencia tres tamaños de tarimas, que en

volumen de madera lleven 8, 14 y 22 pies tabla cada una, los costos del tratamiento de referencia mínimos serían de \$1.60, \$2.80 y \$4.40 respectivamente, y los máximos serían de \$4.00, \$7.00 y \$11.00, por tarima respectivamente.



Figura 34 Muestra de la variación en el tamaño, diseño y volumen de madera que tienen y requieren las tarimas.

Finalmente, sin representar un compromiso, un precio respaldado y menos garantizado por el presente documento, y solo a manera de guía, de las encuestas que se realizaron en terreno a varias empresas que en México están aplicando ya el tratamiento térmico a embalajes de madera, así como el contacto con algunos representantes de equipos, en el Cuadro 7 se da una "referencia estimativa" del precio (2004), de algunas cámaras para el tratamiento térmico fitosanitario, de secadores para madera y de equipos auxiliares.

Cuadro 7.

Estimaciones de campo de precios de algunos equipos utilizados para el tratamiento térmico.

CÁMARAS DE TRATAMIENTO TÉRMICO Y/O ESTUFAS DE SECADO			
N°	DESCRIPCIÓN	CAPACIDAD	PRECIO ESTIMADO (pesos)
1	Equipo para tratamiento térmico, con estructura metálica, de 3.30 m de ancho, 3.80 m de alto y 7.28 m de largo, con caldera para vapor para una capacidad de 350 000 kcal/h, de construcción nacional.	300 tarimas de 40" x 48"	±615,000.00
2	Equipo portátil para tratamiento térmico, estructura metálica en aluminio y acero, de 2.50 m de ancho, 3.00 m de alto y 6.80 m de largo, con quemador de gas para aire caliente hasta de 200 000 kcal/h.	150 tarimas de 40" x 48"	±490,000.00
3	Estufa de secado con cámara de multipanel, con caldera para vapor y quemado de sobrantes de madera. Nacional.	45,000 pt de madera aserrada	±1'500 000.00
4	Accesorios para cámara para tratamiento térmico, con quemador de gas, equipo de control y registro, sistema de humidificación, de 5.50 m de ancho, 4.00 m de alto y 6.00 m de largo.	200 tarimas de 40" x 48"	± 85 000.00 (no incluye el costo de la cámara)
5	Estufa de secado en aluminio y acero inoxidable, de 6.00 m de ancho; 5.20 m de alto y 6.50 m de largo, con caldera para agua caliente, equipo de control automático en PC, sistema de humidificación.	15 000 pt ó 600 tarimas de 40" x 48"	±1'100 000.00
6	Estufa de secado de mampostería, con caldera para vapor, equipo de control y registrador de operación neumática, sistema de calefacción por tubos aletados y sistema de humidificación con vapor.	40 000 pt	±1'268 000.00
CALDERAS Y QUEMADORES DE ACEITE TÉRMICO			
7	Caldera para vapor, combustible diesel, fabricación nacional.	40 HP	± 350 000.00
8	Caldera para agua caliente, de un paso de los gases, control semiautomático, para usar como combustible desperdicios de madera.	337,400.00 kcal/h	± 280 000.00
9	Quemador de aceite térmico, de operación automática, para combustible gas LP, para generar una temperatura hasta de 300 °C	75 757 kcal/h (300 000 BTU/h)	± 86 850.00

CONTROLADORES, TERMOGRAFIADORES Y TERMOSENSORES			
10	Termograficador "Dickson"®, tipo "K", para dos sensores,	-----	± 9 500.00
11	Termograficador "PARTLOW" ® MRC5000, para dos sensores	-----	± 11 000.00
12	Termocupla Tipo "J", con cable recubierto de 6 m, con sensor de 3" x 3/16"	-----	± 2 000.00
13	Computadora, programa y termocuplas para control, registro y graficación del proceso de secado y la temperatura de la madera en PC e impresora.	-----	± 45 000.00 (sin incluir válvulas ni sensores)
14	Controlador registrados de operación semiautomática para estufas de secado, incluyendo válvulas automáticas y psicrómetro.	-----	± 90 000.00

Los datos presentados en el Cuadro 7 fueron reportados por personal que ha estado involucrado con el departamento de compras de algunas industrias instaladas, obviamente se deberá recurrir al proveedor para obtener una cotización precisa, misma que dependerá de las especificaciones que se pretendan o exijan de cada equipo en particular.

TRATAMIENTO FITOSANITARIO CON BROMURO DE METILO

La segunda alternativa para el tratamiento fitosanitario para el embalaje de madera para el comercio internacional que está autorizado por la NOM-144-SEMARNAT-2004, es la fumigación con bromuro de metilo. Este es un gas cuyo manejo requiere de muy particulares cuidados y conocimientos, además de experiencia práctica o capacitación más meticulosa que la requerida para realizar el tratamiento térmico ya descrito. Aunque las características, propiedades y requisitos del bromuro de metilo están indicados en la Norma NOM-144-SEMARNAT-2004, aquí se presenta cierta información básica para que tengan una idea de cómo es este producto quienes pretendan adoptar esta alternativa.

8. 1 Propiedades del bromuro de metilo

8.1.1 Propiedades generales

Nombre común	Bromuro de metilo
Fórmula	CH ₃ Br
Nombres químicos	Bromuro de metilo, Bromometano
Agua, máximo	100 ppm
Acidez, como HBr, máximo	10 ppm
Bromuro de metilo, por peso, mínimo	97.5 %
Cloropicrina por peso, mínimo	2.0 %
Total ingrediente activo por peso, mínimo	99.5 %
Familia química	Alquil bromuro
Peso molecular	94.94
Apariencia, y olor, 760 mm Hg, 20 °C:	gas incoloro e inodoro.
Densidad, líquido, 0 °C/ 0 °C	1.732

Densidad, vapor 760 mm Hg 0 °C (aire = 1)	~ 3.27
Presión de vapor	20 °C 1,400 mm Hg 40 °C 2,600 mm Hg
Viscosidad	0 °C 0.397 Cp
Punto de fusión	-94.1°C
Punto de ebullición, 760 mm	3.56 °C
Solubilidad en agua	20 °C 1.75 g/100g 25 °C 1.34 g/100g
Índice de refracción	-20 °C 1.4432 nD

8.1.2 Capacidad calórica:

Sólido	- 96.6 °C 0.165 cal/g/°C
Líquido	- 13.0 °C 0.197 cal/g/°C
Vapor	25 °C 0.107 cal/g/°C
Calor latente de fusión	p.f. 15.05 cal/g
Calor latente de evaporación	p.e. 60.20 cal/g
Coeficiente de expansión	-15 a 3 °C 0.00163 /°C
Constante dieléctrica, 0°C (103 a 105) ciclos/seg	9.77
Temperatura crítica	194 °C

8.1.3 Límites de inflamabilidad; (bromuro de metilo en aire)

Punto de inflamabilidad, TCC	Ninguno
Temperatura de autoignición	537 °C
Límite inferior de explosividad, vol. %	~ 10%
Límite superior de explosividad, vol %	~ 15%
La ignición del bromuro de metilo puede ser provocada por una chispa de alta energía en los límites de inflamabilidad indicados anteriormente.	

Sin olvidar que el tratamiento con bromuro de metilo lo deben realizar solamente personal capacitado y autorizado y en condiciones también certificadas, a continuación se da una descripción sintetizada de las condiciones requeridas para esta alternativa de tratamiento fitosanitario al embalaje de madera, condiciones y requisitos que están adecuadamente descritos y establecidos en la Norma NOM-144-SEMARNAT-2004.

8.2 Factores abióticos para las cámaras

Temperatura. Este es el elemento más importante para obtener un buen resultado en una fumigación. El bromuro de metilo se evapora a 3.6°C; abajo de esta temperatura esta líquido y no tiene acción como fumigante. Tiene desde luego un efecto directo si el líquido toca la plaga, pero cubrirá un espacio de 23 cm³ con la cantidad (40 g) de bromuro que serviría para fumigar 1 m³, en condiciones normales.

A temperaturas entre 7°C y 15°C es factible hacer una fumigación pero las condiciones no son ideales. La evaporación del bromuro es lenta, en parte por la baja temperatura y en parte porque al evaporarse se enfría. La difusión es más lenta y por tanto tarda en llegar a los puntos alejados de la de introducción del gas, particularmente si la mercancía a fumigar está muy compacta.

Un nivel bajo de actividad metabólica de las plagas, (insectos, nemátodos, etc.), hace que tengan más resistencia a la fumigación y que se tenga que aumentar la dosis, el tiempo de exposición, o ambos; en este rango de temperatura es recomendable utilizar algún tipo de vaporizador. Los mejores resultados en fumigaciones se obtienen a temperaturas superiores a los 15°C. A medida que sube la temperatura, es factible reducir las dosis y tiempos de exposición, con los ahorros subsecuentes en costo y en tiempo operativo.

Humedad. Las fumigaciones se ven afectadas en diversas formas por la humedad. Tiene trascendencia tanto la humedad relativa de la atmósfera a fumigar como la humedad del producto a fumigar. En términos generales, conviene evitar la humedad relativa demasiado alta (arriba del 70%) ya que tiene un efecto negativo al retener algo del bromuro de metilo. El agua condensada sobre la mercancía aumenta los residuos de bromo orgánico.

Demasiada humedad en el material a fumigar puede disminuir la efectividad del fumigante al interferir con su difusión, además que la humedad también interfiere con las lecturas de los analizadores de gas por conductividad térmica; dicha humedad debe eliminarse con material desecante para obtener lecturas correctas.

Vaporización. A partir de que se obtiene una cierta concentración de gas en la atmósfera fumigada, el bromuro de metilo ejerce su acción efectiva, congruente con el tiempo de exposición previsto. Es por tanto de gran trascendencia en la mayoría de las situaciones, que se obtenga lo más rápidamente posible la concentración deseada; es a partir de este momento que empieza a contar el tiempo de exposición.

Aunque el bromuro de metilo evapora rápidamente arriba de los 4°C, al evaporarse toma unas 60 calorías por cada gramo que se evapora (calor latente de evaporación). En consecuencia, en un sistema cerrado o restringido, como lo pueden ser las mangueras de inyección o un espacio limitado, como una cubierta plástica, el bromuro se va enfriando y la evaporación va siendo cada vez más lenta. Si la temperatura es menor de 15°C, hay problema para alcanzar con rapidez la concentración planeada de fumigación, por lo que es conveniente que la temperatura de fumigación sea superior a los 15°C.

Aireación de la Cámara. Para permitir la toma de lecturas con tubos colorimétricos durante la aireación, cada cámara debe estar equipada con, por lo menos, un tubo metálico permanente para muestreo de gas. Cualquier extensión del tubo de muestreo de gas o de las conexiones flexibles debe hacerse de manguera de Teflón o de metal. El tubo de muestreo de gas debe colocarse cerca del ducto de extracción, dentro de la cámara. El tubo de muestreo de gas debe extenderse hacia afuera de la cámara para permitir las lecturas de los tubos colorimétricos. Se procede a hacer funcionar el sistema de extracción tanto tiempo como sea necesario para obtener, por lo menos, cuatro cambios completos de aire (alrededor de 4 a 15 minutos).

8.3 Aplicación del bromuro de metilo

8.3.1 Concentración por tiempo

La dosis se interpreta como la concentración del fumigante en la atmósfera fumigada. El principio fundamental es lograr la mejor combinación de concentración y tiempo (C x T) justa para el objetivo que se persigue.

Si el tiempo no es limitante se elige una dosis o concentración tan baja como sea posible, en términos de la gama de plagas presentes y sus estadios, del grado de infestación y la relación costo /beneficio del tratamiento. Si por el contrario, el tiempo es crítico, en razón de las ventajas operativas de terminar la fumigación con rapidez, se usa una concentración tan alta como sea recomendable en razón de la misma relación costo-beneficio. Existen desde luego otros factores a considerar, como el efecto de la temperatura o el riesgo de daño a los productos fumigados, pero el criterio fundamental es básicamente económico.

Cuando el objetivo es evitar la introducción a la región o al país de plagas no endémicas a través de las fumigaciones cuarentenarias, el valor económico del riesgo es tan alto que las concentraciones y tiempos prescritos por las autoridades fitosanitarias son los necesarios para asegurar la eliminación de las plagas, en este caso, las concentraciones están establecidas en la NOM-144-SEMARNAT-2004.

8.3.2 Cálculo de la dosis

Los elementos que se deben considerar son el volumen de la cámara de fumigación (m^3), las temperaturas del producto y del ambiente, y decidir el programa de tratamiento a usar. El estándar mínimo para el tratamiento de fumigación con bromuro de metilo aplicado al embalaje de madera de acuerdo a la NOM-144-SEMARNAT-2004 es el indicado en el Cuadro 8 y consiste en lo siguiente: por cada $5^{\circ}C$ que se espere que baje la temperatura ambiente mínima por debajo de $21^{\circ}C$ deberán agregarse $8 g/m^3$. La temperatura mínima no debe ser inferior a $10^{\circ}C$ y el tiempo de exposición mínimo deberá ser de 16 horas.

Cuadro 8.

Fumigación con bromuro de metilo (NOM-144-SEMARNAT-2004)

Temperatura	Dosis g/m ³	Horas de exposición	Registros mínimos de concentración (g/m ³) durante				Tiempo de aireación (h)
			30 min	2 h	4 h	16 h	
21°C o mayor	48	16	36	24	17	14	12
16°C a 20.9°C	56	16	42	28	20	17	12
11°C a 15.9°C	64	16	48	32	22	19	12

8.4 Medidas de seguridad

Debido a los riesgos que implica el manejo del bromuro de metilo, es necesario tomar en cuenta las siguientes consideraciones y traducirlas en estrictas normas de seguridad:

- El riesgo depende de la concentración, el tamaño del local y las condiciones físicas de los trabajadores (alergias, problemas respiratorios o cardíacos, etc.).
- Es fundamental conocer las características del bromuro de metilo. Utilizar el equipo adecuado y de manera adecuada para efectuar la fumigación y conocer los primeros auxilios a administrar en caso de que ocurra un accidente.
- La ropa protectora a utilizar debe de ser adecuada. No usar guantes de carnaza o cuero, sino de hule, no usar anillos ni relojes durante la aplicación. Usar un delantal de hule que debe ser suficientemente largo, para proteger las piernas de la exposición.
- En los dosificadores del fumigante el resguardo protector irrompible es indispensable.
- El área alrededor del local que se está fumigando deberá estar bien ventilada. Los operadores deberán colocarse en favor del viento.
- Nunca se deberá entrar en sitios o almacenes fumigados hasta estar bien ventilados. El vapor o gas de los fumigantes es sumamente venenoso; por lo tanto, evitese respirarlo pues puede tener consecuencias graves

en la salud si lo absorben las personas. Si fuera necesario permanecer en el área, el aire deberá ser monitoreado para determinar si están presentes concentraciones del fumigante.

- Es obligatorio utilizar los respiradores para acercarse a menos de 10 m del lugar de la fumigación, o cuando se excede el umbral de seguridad (5 ppm). Por breves períodos pueden usarse máscaras anti-gas. Para bromuro de metilo se usan las máscaras de cara completa con filtro negro, a base de carbón activado, contra vapores orgánicos tipo M.S.A., modelo G.M.A. o G.M.C. o su equivalente y anteojos de seguridad al manejar o aplicar el producto.
- Debe estar prohibido comer, beber, fumar o llevar tabaco en las áreas en que se usa el bromuro de metilo.-
- En el uso de este producto, se recomienda trabajar por parejas para evitar posibles accidentes.
- Deben practicarse periódicamente análisis de sangre y exámenes físicos (que conviene arreglar anticipadamente con un centro médico local) de las personas que trabajan regularmente con el bromuro de metilo.
- Colocar letreros claramente visibles con los números telefónicos de hospitales locales, médicos y centros médicos de emergencias, son muy importantes.
- Se deberá dar un adecuado entrenamiento a todos los trabajadores ya que deben aprender a reconocer los signos y síntomas de intoxicación por bromuro de metilo y sobre su manejo.
- Los riesgos de accidentes aumentan en trabajadores cansados, por lo que los supervisores deben vigilar la aparición de señales de fatiga.
- Lavarse con agua y jabón y cambiarse de ropa después de la aplicación.
- Además de un respirador de aire auto-contenido destinado para rescate de emergencia, es conveniente que exista uno de éstos para cada operador.

- Por ninguna razón el operador debe exponerse a concentraciones que rebasen el estándar mínimo de seguridad.

El principal riesgo al manejar el bromuro de metilo es en primer lugar la inhalación y en segundo, la salpicadura sobre los ojos. La mayor posibilidad de exposición ocurre al hacer las conexiones del cilindro y de los aplicadores, por fugas y durante la aireación.

Debe tenerse en cuenta que el bromuro de metilo es inodoro, razón por la cual se le agrega un 2% de cloropicrina, que por su olor penetrante y acción lacrimógena sirve como agente delator. Aún así es importante evitar la exposición al fumigante y usar el respirador auto-contenido cuando se considere pudiera haber una exposición accidental.

ALMACENAMIENTO DEL EMBALAJE DESPUÉS DEL TRATAMIENTO FITOSANITARIO

9.1 Almacenamiento del embalaje después del tratamiento térmico

La madera es un material higroscópico, anisotrópico y biodegradable. Lo anterior significa que, aunque la madera se haya sometido a un proceso de secado, no significa que se mantendrá permanentemente seca o con un bajo contenido de humedad. Si la madera seca se expone a la lluvia o a un ambiente muy húmedo, obviamente volverá a absorber agua, con las consecuencias y problemas que ello ocasiona tales como el hinchamiento, incremento de peso y pérdida de resistencia mecánica, aparte de las deformaciones y mayor susceptibilidad al desarrollo de hongos de manchado y pudrición, aunque estos últimos no sean de importancia cuarentenaria.

Las deformaciones que experimenta la madera se pueden manifestar cuando se seca o cuando se humedece; éstas se deben a que las contracciones e hinchamientos de la madera, cuando cambia su contenido de humedad en el intervalo del 0 al 30%, no son de igual magnitud en sus diferentes direcciones y cortes, dando como resultado una alteración de la forma original (deformación), con la consecuente afectación de las características y propiedades del producto elaborado (embalaje).

Por otro lado, si la madera, como se mencionó, se mantiene con un elevado contenido de humedad, se estarán dando las condiciones para que los hongos causantes del manchado (cromógenos) y de la pudrición (xilófagos) se desarrollen en la tarima o embalaje, degradando e incluso desclasificando tal artículo para muchas aplicaciones, tal como es el caso de tarimas para el manejo de productos alimenticios, granos y medicamentos, entre otros.

Finalmente, si la madera se expone mucho tiempo a la intemperie, independientemente del efecto de la humedad o la lluvia, la prolongada exposición a los rayos solares también causarán un efecto de degradación, que inicialmente se refleja por un cambio de color hacia tonos grisáceos, continuando con un efecto de erosión y agrietamiento (intemperismo).

Por lo anterior, es fundamental que todo el embalaje de madera que se haya sometido a un tratamiento fitosanitario se almacene, en primer lugar, bajo cubierta, segundo, que se proteja de la lluvia y fuentes de alta humedad. Debe almacenarse no en una bodega cerrada, sino más bien en un área que tenga buena circulación del aire, para evitar el estancamiento de humedad que pueda favorecer la condensación y posible desarrollo de hongos, Figura 35.

Los embalajes de madera no deben permanecer mucho tiempo almacenados en un mismo sitio, pues ello puede también favorecer la infestación de insectos xilófagos.

Solamente cuando el embalaje, además del tratamiento térmico, ha sido sometido a un proceso de secado o se elaboró con madera seca, puede almacenarse en un lugar cerrado o se puede cubrir con algún material impermeable (plástico, papel kraft, etc.) para su resguardo o transporte.

Tomando en cuenta los aspectos mencionados, se deben entonces considerar las siguientes medidas para el manejo y almacenaje del embalaje de madera tratado:

- No almacenar a la intemperie el embalaje tratado, ni exponerlo a la lluvia o a fuentes de humedad elevada
- Colocarlo bajo cubierta, separado del suelo, en un área ventilada
- No almacenar embalaje tratado junto con embalaje o madera sin tratamiento fitosanitario.
- No almacenar embalaje tratado pero verde, en lugares cerrados sin ventilación.
- Evitar en lo posible mantener por tiempo prolongado en bodega el embalaje.
- Eliminar de la planta o empresa todo material de madera contaminado, infestado o podrido y por ningún motivo colocarlo cerca de la madera tratada.

- Llevar un registro de la fecha en que se aplicó el tratamiento a cada lote de embalaje como parte del control de inventario.



Figura 35. El embalaje de madera tratado térmicamente debe almacenarse bajo techo, pero con buena ventilación y por tiempo reducido.

9.2 Almacenamiento del embalaje después del tratamiento con bromuro de metilo

- En primer lugar es importante considerar que el embalaje de madera tratado con bromuro de metilo, al término de éste, debe airearse o ventilarse por lo menos durante 6 horas.
- Para prevenir la contaminación, colocar el material en un lugar que reúna las condiciones fitosanitarias, tales como paredes sin grietas, techo sin filtraciones de agua, desagües limpios y cerrados.
- El área de almacenamiento del material tratado debe de estar separada del área de recibo y manejo del material a ser tratado.
- El embalaje tratado no debe colocarse directamente sobre el suelo.
- Al almacenar embalaje tratado por más de cinco días, debe cubrirse con un material anti-insectos (mallas de monofilamento).
- La inspección diaria del material tratado para asegurar la ausencia de insectos que contaminen el embalaje, es obligación del encargado de las instalaciones.

GLOSARIO

A

Agrietamiento. Proceso de separación de las fibras de la superficie de la madera causado por esfuerzos elevados de contracción cuando la madera pierde humedad en esa zona.

Ambrosía. Insectos coleópteros que barrenan la madera verde e inoculan un hongo cromógeno del cual se alimentan.

Anisotrópico. Fenómeno físico que identifica a un material cuyas propiedades y características difieren según sea la dirección o plano que se esté evaluando.

Apanalamiento. Se denomina así a la formación y presencia de grietas en el interior de la madera, las cuales no son evidentes en su superficie. Se pueden producir como consecuencia del colapso o la manifestación de esfuerzos internos de contracción.

C

Calor específico. Cantidad de calor (kcal) que requiere un material para elevar en un grado ($^{\circ}\text{C}$), la temperatura de una unidad de masa (kg). En el sistema internacional se reporta en kcal/kg

Colapso. Aplastamiento que sufren algunas células de la madera cuando su contenido de humedad aun es elevado, causando una reducción del espesor de la pieza semejante a la contracción. Se puede manifestar cuando se aplican elevadas temperaturas en madera verde poco permeable.

Combustión directa. Se denomina así a las estufas de secado cuyo sistema de calefacción se genera por los gases de combustión que son alimentados a la cámara directamente de un quemador de gas.

Contenido de humedad. Cantidad de agua presente en una pieza de madera, pero expresada en términos de porcentaje referido a su peso anhidro.

Contenido de humedad en equilibrio (CHE). Contenido de humedad al que tiende estabilizarse una madera en su proceso de secado, o bien, de humectación, cuando se mantiene a una temperatura y humedad relativa fija.

D

Densidad básica. Peso de la madera, en estado anhidro (Po), por unidad de volumen en estado verde (Vv), que caracteriza a una madera (Po/Vv). Se reporta en g/cm^3 o en Kg/m^3

Depresión del bulbo húmedo. Diferencia de temperatura que registra el termómetro húmedo con respecto a la temperatura normal o del termómetro seco en un psicrómetro. La diferencia o depresión está directamente relacionada con la humedad relativa del aire y, por lo tanto, sirve para evaluar ésta.

Desviador. Lámina que se instala en algunos sitios dentro de una cámara de secado, para hacer que el aire se conduzca en dirección y por zonas específicas para eficientar su circulación.

E

Embalaje. Contenedor, plataforma, o recipiente diseñado y construido para transportar, almacenar o proteger una mercancía o producto.

F

FAO. Organización Mundial para la Agricultura y la Alimentación.

Fumigación. Proceso de aplicación a un artículo o área de un agente químico tóxico, generalmente en estado gaseoso, para la erradicación de una plaga.

H

Higroscópico. Propiedad que tienen algunos materiales de adsorber o desorber humedad, en forma de vapor, de y hacia el aire que lo rodea, tratando de alcanzar un estado de equilibrio.

Hongo cromógeno. Hongo que se desarrolla en madera verde o húmeda, sin causar pudrición, pero cuyo micelio causa el manchado o alteración del color original de la madera.

Hongo xilófago. Hongo que se desarrolla en la madera verde o húmeda asimilando los compuestos químicos que la forman, causando con ello el fenómeno de pudrición.

HT. Siglas que identifican internacionalmente en una marca, la aplicación del tratamiento térmico fitosanitario en un embalaje de madera.

Humedad relativa. Cantidad de vapor de agua contenido en un metro cúbico de aire, expresado como un porcentaje en relación al máximo que es capaz de sostener a una determinada temperatura.

Humidificador. Tubo con perforaciones o ranuras distribuidas a lo largo, que se instala en el interior de una estufa de secado para introducir vapor o agua al aire de calefacción, para cuando se requiere elevar la humedad relativa del mismo.

M

Madera anhidra. Se dice de la madera que fue sometida a una deshidratación total y no contiene agua.

Madera seca. Se dice de una madera que fue sometida a un proceso de secado y su contenido de humedad es inferior al 18 %.

Madera verde. Se dice de la madera recién cortada de árboles vivos o cuyo contenido de humedad es superior al 18 %. Madera que no ha sido sometida a condiciones de secado.

Medida Fitosanitaria. Aplicación de un tratamiento al embalaje de madera con el propósito de reducir el riesgo de introducción o diseminación de plagas cuarentenarias.

N

NIMF N° 15. Norma internacional de medidas fitosanitarias N° 15 denominada "Directrices para reglamentar el embalaje de madera utilizado en el comercio internacional", publicada por la Convención Internacional de Prevención Fitosanitaria de la FAO.

P

Patógeno. Organismo cuya presencia y desarrollo causa enfermedades en los seres vivos.

Pie tabla. Unidad de volumen de madera de uso internacional y que se usa para cuantificar la cantidad de madera que tiene una pieza aserrada. Representa un prisma rectangular de una pulgada (2.54 cm) de grueso, doce pulgadas (30 cm) de ancho y un pie (30 cm) de longitud.

Plafón. Cubierta de madera o lámina que se instala en la parte interna superior de una cámara o estufa de secado, para conducir el aire de ventilación a lo ancho de la cámara. Se complementa con los desviadores.

Plaga cuarentenaria. Una plaga de importancia económica potencial para el área en peligro aun cuando la plaga no existe o, si existe, no está extendida y se encuentra bajo control.

PLC. Controlador lógico de proceso. Dispositivo que, mediante señales eléctricas, permite registrar y/o controlar ciertas operaciones de un equipo, máquina o proceso.

Psicrómetro. Conjunto de dos termómetros de los cuales uno tiene la parte sensible cubierto por una mecha que se mantiene húmeda por el fenómeno de capilaridad, y cuya evaporación, al depender de la humedad relativa del aire, permite evaluar la magnitud de ésta.

Punto de saturación de la fibra. Estado de humedad de la madera donde sus células no contienen ya agua en los lúmenes, pero sus paredes celulares si están saturadas de agua. Generalmente se toma como referencia el valor del 30 % de contenido de humedad. Cuando la madera pierde humedad por debajo de este nivel es cuando se manifiestan las contracciones y varios otros cambios en las propiedades de la madera.

S

Sonda. Ver Termocupla.

T

Termocupla. Elemento metálico construido por la unión de dos metales, y cuya reacción diferente a los cambios de temperatura permite transformarla a señales eléctricas que se pueden medir y determinar la temperatura que causó dicho diferencial.

Termógrafo. Aparato registrador, ya sea digital o análogo, que permite registrar la temperatura y su variación de la o las sondas que se le conectan.

X

Xilohigrómetro. Aparato que sirve para medir el contenido de humedad en la madera, midiendo la resistencia que opone al paso de una corriente eléctrica, misma que es inversamente proporcional a dicho contenido de humedad en el rango del 6 al 28 %.

BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

- ANÓNIMO. 2004. Guía para regular el embalaje de madera utilizado en el comercio Internacional. <http://www.procomer.com/publicaciones/docs/circular/>
- BRITTON, K. O. y J. H. SUN. 2002. Unwelcome guest: exotic forest pest. *Ada Entomologica Sínica*. 45(1):121-130
- CICLONIK MEXICANA, s/f. Catálogo del fabricante de calentadores de líquido térmico. Los Reyes La Paz. México. 12 p.
- CIBRIAN T., DAVID; J. T. MÉNDEZ; R. CAMPOS; H. O. YATES y J. E. FLORES. 1995. *Insectos Forestales de México*. Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco, México. 435 p.
- FAO, 2002. International Standards for Phytosanitary Measures. Guidelines for regulating wood packaging material international trade. FAO. Publication No. 15, 11 p.
- FAO, 2004. Centro de Aplicación de Tratamientos a Embalajes de Madera. Norma Internacional de Medidas Fitosanitarias (NIMF) N° 15 de FAO. <http://www.e-campo.com/sections/news/display.php/uuid.5E67629F-6FD4>
- FAX MÉXICO, 2001. Manual Técnico de Bromuro de Metilo. FAX MEXICO, S.A. de C.V. <http://www.faxsa.com.mx/bromuro/MZ>
- FPL. 1999. Wood Handbook. Report FPL-GTR-113. Forest Products Laboratory. Madison, pp 3-15 y 3-21.
- FUENTES F. J.; J. A. SILVA y E. MONTES. 1996. Manual del secado técnico convencional de la madera. Universidad de Guadalajara. Guadalajara, México. 122 p.
- FUENTES S., MARIO s/f. Apuntes para el curso de tecnología de la madera I. Serie de apoyo académico 33. División de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, México. 97 p.
- FUENTES S., MARIO y R. VARGAS. 1994. Estudio de viabilidad para el establecimiento de una planta de secado de madera en la Sierra Norte de Oaxaca. Universidad Autónoma Chapingo, División de Ciencias Forestales, Texcoco, Méx. 80 p.
- HILDEBRAND R., 1961. El secado de madera aserrada. Robert Hildebrand ed., Comercial Sagrera, Sabadel, España. 164 p.

- INCOMAC, s/f. Sistemas para el secado de la Madera. Catálogo del proveedor. INCOMAC S. R. L., Montebelluna, Italia. 6 p.
- INFOR, 1999. Secado artificial de la madera aserrada en la región del Bío Bío. Instituto Forestal, Informe Técnico 145. Concepción, Chile. 44 p.
- JIMÉNEZ P., FCO. JAVIER. 1999. La Madera: propiedades básicas. GET, Madrid. 154 p.
- JUNAC, 1989. Manual del grupo andino para el secado de maderas. Junta del Acuerdo de Cartagena. Lima, Perú. 299 p.
- KOLLMANN, F., 1959. Tecnología de la madera y sus aplicaciones. Tomo primero. Traducido de la 2ª ed. alemana. Instituto Forestal de Investigaciones y Experiencias. Ministerio de Agricultura. Madrid. 675 p.
- KRAEMER K., GUSTAV 1958. Compendio de la conservación de maderas. Imprenta Cervantina, Santander. 526 p.
- MARSHALL, S. W. 2000. Pallets move the world. The need for international pallet standards. ISO Bulletin. Agosto 2000. 15-17 pp.
- NARDI, s/f. Secaderos para madera, Catálogo del fabricante. Soave, Italia. 32 p.
- POBLETE W., HERNÁN. 2001. Tableros de partículas. Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile. 177 p.
- RODRÍGUEZ B., JOSÉ A. 1998. Patología de la madera. Fundación Conde del Valle de Salazar y Mundi-Prensa. Madrid. 349 p.
- SEMARNAT, 2003. NORMA Oficial de Emergencia NOM-EM-144-SEMARNAT-2003, Que establece las especificaciones técnicas de la medida fitosanitaria (tratamiento) y el uso de la marca que acredita la aplicación de la misma, para el embalaje de madera que se utiliza en el comercio internacional. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Diario Oficial de la Federación. Miércoles 26 de noviembre de 2003. México, D. F. 24 – 26 pp.
- SEMARNAT, 2004. Norma Oficial Mexicana NOM-144-SEMARNAT-2004, que establece las medidas fitosanitarias reconocidas internacionalmente para el embalaje de madera, que se utiliza en el comercio internacional de bienes y mercancías. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, D. F. 16 p.
- SIMPSON, W. T. 1997. Dry Kiln Operator's Manual. Forest Products Society. USDA-FS-FPL. Madison. 274 p
- SIMPSON, W. T. 2002. Effect of wet bulb depression on heat sterilization time of slash pine lumber. USDA-FS-FPL. Research paper, FPL-RP-604. Forest Products Laboratory, Madison. EEUU, 6 p.
- THERMO MAC de MÉXICO, s/f, Manual de operación para calentadores TM. México, D. F. 30 p.

- TRUJILLO A., GABRIEL. 1993. Determinación de secuelas de acondicionamiento de madera para la obtención de chapa rebanada. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco, México. 87 p.
- VIGNOTE P., SANTIAGO y FCO. J. JIMÉNEZ P. 2000. Tecnología de la madera, 2ª. Ed. Mundi-Prensa, Madrid. 653 p.
- ZIRO INDUSTRIAL, s/f. Catálogo de estufas de secado del fabricante. Ziro Industrial, S. A. de C. V., Durango, Dgo. 8 p.

Esta Guía fue elaborada por la
Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
con la colaboración de la
Universidad Autónoma Chapingo
y la participación directa del
M.C. Mario Fuentes Salinas