

CÁLCULO DEL CONSUMO CALORÍFICO EN EL SECADO DE LA MADERA

Conde García, M.; Fernández-Golfín Seco*, J.I.; Mier Pérez, R.*

Departamento de Ingeniería Forestal
E.T.S. Ingenieros Agrónomos y Montes
Universidad de Córdoba
martaconde@ies.es

*Laboratorio de Estructuras de Madera
INIA (Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias y Alimentarias)
Ctra. de La Coruña Km. 7,5
28040 Madrid
golfin@inia.es

Resumen

El conocimiento de las cifras energéticas del secado de la madera es fundamental a la hora de diseñar tanto los elementos de calefacción del propio secadero como la caldera.

Muchas han sido las controversias y las cifras apuntadas, obtenidas de un modo empírico y por lo tanto fuertemente afectadas por las características de las instalaciones.

En el presente trabajo se lleva a cabo un cálculo teórico de tales cifras, propiciando con ello un mejor conocimiento de los procesos termodinámicos que tienen lugar durante el proceso del secado de la madera.

Palabras clave: energía del secado, secado, madera

INTRODUCCIÓN

Diversas, y a veces contradictorias, cifras de consumo energético durante el secado han sido recogidas por varios autores (FERNÁNDEZ-GOLFÍN SECO y ÁLVAREZ NOVES, 1998; ECKELMAN y BAKER, 1976; JOLY y MORE-CHEVALIER, 1980; VILLIÈRE, 1966).

Este hecho provoca que en muchos casos el cálculo de los sistemas de calefacción de los secaderos y por extensión de las calderas sea inadecuado.

Estas cifras dependen enormemente de las condiciones higrométricas del secado, de las características y tecnología del secadero, de la humedad del material, de las características y tipo de madera, de la forma del apilado, etc.

Por los motivos antes apuntados es muy difícil, por no decir imposible, aportar valores exactos de consumos energéticos en el secado, aunque sí sea posible realizar una aproximación bastante fiable a los mismos.

En este trabajo se lleva a cabo un cálculo teórico-práctico de tales cifras, propiciando con ello un mejor conocimiento de los procesos termodinámicos que tienen lugar durante el proceso del secado de la madera.

ENERGÍA CALORÍFICA NECESARIA PARA EL PROCESO DE SECADO DE LA MADERA

La energía calorífica necesaria para secar un lote de madera puede ser dividida en los siguientes conceptos:

1. Calor necesario para calentar la madera verde hasta la temperatura de comienzo de secado
2. Calor necesario para elevar la temperatura del secadero y del aire interno hasta el valor de consigna o de comienzo del secado
3. Calor necesario para evaporar el agua, es decir el calor latente de vaporización
4. Calor necesario para deslizar el agua de la madera, es decir el calor diferencial de sorción
5. Calor necesario para calentar el aire entrante hasta el valor de consigna
6. Calor necesario para compensar las pérdidas caloríficas por fugas de aire (fundamentalmente a través de las puertas y la ventilación), de conducción (paredes y suelo), etc.

Si la cantidad de energía consumida en cada uno de estos apartados fuera conocida o modelizable, se podría calcular de forma teórica y con bastante aproximación la cantidad total de energía calorífica necesaria para secar un lote de madera. Desgraciadamente, alguno de estos factores resulta de muy difícil determinación, motivo por lo cual en muchos casos el cálculo teórico difiere del valor real observado en la práctica.

No obstante lo anterior y como primera aproximación al problema del cálculo de la energía calorífica necesaria para el secado de la madera, lo que sí es posible analizar de una forma teórica es la cantidad de energía necesaria para secar la madera, suponiendo que no existen pérdidas térmicas en el proceso. Con posterioridad será necesario aportar datos empíricos medios que nos permitan mayorar estos requerimientos energéticos en función de los intercambios caloríficos con el medio circundante.

Si nos fijamos en los apartados 3 y 4 anteriores, los únicos abordables desde un punto de vista teórico, debemos indicar que la suma de ambos es la conocida como **Energía Intrínseca** (SKAAR, 1977) o energía calorífica que es necesario comunicar a la madera para remover de ella el agua. El primer componente de esta energía intrínseca será la energía necesaria para vaporizar

el agua, determinada por el calor latente de vaporización (Q_0) o cantidad de calor que es necesario comunicar para evaporar 1 kg de agua. El segundo componente será el correspondiente a la energía necesaria para romper los enlaces agua-madera (sólo por debajo del psf), determinada por el calor diferencial de sorción (Q_L).

De acuerdo con esto, el cálculo teórico de la Energía Intrínseca (EI), se efectuará dividiendo el proceso en dos fases, siendo la primera la que se desarrolla por encima del punto de saturación de las fibras (psf) y la segunda la que se desarrolla por debajo.

En la primera de estas fases (por encima del psf), el cálculo de la Energía Intrínseca se efectúa mediante la expresión:

$$EI = Q_0 * n^\circ \text{ de litros evaporados en dicha fase} = 585 * m, \text{ en kcal}$$

En la segunda fase (desde el psf al final), al ser ya necesario romper los enlaces agua-madera (al no haber ya agua libre), el cálculo de la EI se haría mediante la expresión:

$$EI = Q_V * n^\circ \text{ de litros evaporados en dicha fase, en kcal}$$

Para calcular el valor Q_V es necesario conocer la expresión de cálculo del calor instantáneo de vaporización Q_{Vi}

El valor del calor total de vaporización en cada momento (Q_{Vi}) viene dado por la expresión (SKAAR, 1972):

$$Q_{Vi} = Q_0 + Q_{Li} = 585 + 278^{-0.14H}, \text{ en kcal/kg de agua evaporada}$$

En esta expresión H es la humedad de la madera en cada momento en % (por debajo del psf), y Q_{Li} representa la variación del calor diferencial de sorción con la humedad, la cual es una curva exponencial creciente conforme H disminuye, lo cual significa que por debajo del 30% de humedad cada vez es más costoso energéticamente extraer el agua de la madera.

Para conocer de la expresión anterior cuál es la cantidad total de energía que es necesario comunicar para secar una madera desde una humedad inicial H_i (<psf) hasta una final H_f es necesario integrar la ecuación anterior entre ambos valores, llegándose a la siguiente expresión, en kcal/kg:

$$Q_v = 585 + \frac{1984 \cdot (e^{(-0.14H_f)} - e^{(-0.14H_i)})}{(H_i - H_f)}, \text{ en kcal/kg de agua evaporada, siendo } H_f < H_i < \text{psf}$$

De todo lo hasta ahora citado, para el caso de un roble, de densidad básica 570 kg/m^3 , la Energía Intrínseca, por m^3 , se calcularía como sigue:

- Primera fase (del 100 al 30%):
 - Cantidad de agua a evaporar: $M_v = 570 \text{ kg/m}^3(100-30)/100 = 399 \text{ kg/m}^3$
 - Cantidad de energía necesaria: $EI_1 = 585 \text{ kcal/kg} * 399 \text{ kg/m}^3 = 227.430 \text{ kcal/m}^3$
- Segunda fase (del 30 al 10%):
 - Cantidad de agua a evaporar: $M_v = 570 \text{ kg/m}^3(30-10)/100 = 114 \text{ kg/m}^3$
 - Cantidad de energía necesaria:

$$EI_2 = 585 * 114 + (1984(e^{(-0.14*10)} - e^{(-0.14*30)}) / (30-10)) * 114 \text{ kg/m}^3 = 69.309 \text{ kcal/m}^3$$
- Total EI = $227.430 + 69.309 = 296.739 \text{ kcal/m}^3$

La Energía Intrínseca así calculada correspondería a la necesaria para secar la madera pero en un estado ideal en el que no existieran ni pérdidas ni fuera necesario calentar la madera y el recinto de secado.

Es por ello que aparece un segundo gran sumando, que se corresponde con la **Energía Extrínseca**, o energía extraña al proceso de secado. Este gran sumando engloba a su vez varios componentes, compuestos por:

- La energía necesaria para calentar la madera y el secadero
- La energía necesaria para calentar y humidificar el aire de renovación entrante
- La energía necesaria para compensar las fugas por falta de estanqueidad o radiación del secadero, así como por expulsión de aire caliente y húmedo.

El primero de los sumandos de la Energía Extrínseca (EE) corresponde a la necesaria para calentar la madera y el secadero. Con respecto al calentamiento de la madera, la cantidad de energía necesaria para elevar su temperatura hasta la del comienzo del secado depende de su calor específico, el cual es función de su humedad, si bien puede considerarse un valor medio de $0,324 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$. En el caso de un roble con densidad al 100% de 1.140 kg/m^3 , que necesita elevar su temperatura en 40°C , esta

cifra alcanza la nada despreciable cantidad de 14.774 kcal/m³.

El cálculo teórico de la energía necesaria para calentar el secadero no es de fácil desarrollo, por lo que será obviado.

Con respecto al segundo de los sumandos, el correspondiente al calentamiento y humidificación del aire entrante, SKAAR (1977) lo evaluó de forma empírica en un 16% de la energía total necesaria (Intrínseca+Extrínseca) para el secado. Dado lo complicado del cálculo de los volúmenes de aire de renovación que entran en el secadero junto con sus condiciones higrotérmicas, nos basaremos en la experiencia de Skaar para efectuar el balance energético final del proceso de secado.

Con respecto al tercer de los sumandos, el correspondiente a la compensación de las fugas térmicas en el secadero, es necesario indicar que estas fugas pueden producirse:

- **Por convección:** Las que se producen al regular la humedad relativa interior mediante la expulsión de aire húmedo y caliente y la introducción de aire frío y seco. Estas pérdidas quedan fuertemente reducidas si se trabaja a circuito cerrado, lo que solo ocurre cuando se emplean sistemas por bomba de calor en circuito cerrado. Las pérdidas se maximizan con la falta de estanqueidad de los secaderos (fugas) o con maniobras inadecuadas. Una adecuada construcción de las células y una minuciosa regulación pueden hacer que se minimicen las pérdidas por este motivo.
- **Por conducción:** Las que se producen por conducción a través de las paredes, suelo y techo del secadero. Estas pérdidas dependen fuertemente del aislamiento térmico del recinto, de la duración del proceso (son mayores para la frondosas duras que para las blandas) y del gradiente de temperatura interior-exterior. Respecto de esta variable, hay autores como CULPEPPER (2000) que basándose en datos empíricos llegan a la conclusión de que la influencia de este factor en el consumo energético global del proceso alcanza un valor medio del 0,48% en climas templados, llegando hasta el 5-6% en climas muy extremos.

Este tercer sumando, cuya anulación es imposible en la práctica y que está tan fuertemente condicionado por las pérdidas por convección, podía llegar a representar en los secaderos antiguos hasta el 40% (SHOTTAFER y SHULER, 1974; SKAAR, 1977) del total de energía necesaria para el secado (es decir, que la energía perdida de esta forma casi igualaba a la energía intrínseca para el secado). Con los modernos secaderos esta cifra se ha visto muy fuertemente rebajada, hasta valores en el entorno del 30%, valor que usaremos en nuestros cálculos.

De acuerdo con lo hasta aquí mencionado, el cálculo energético en nuestro ejemplo con madera de roble sería como sigue:

$$ET= EI+EE= 296.739 \text{ kcal/m}^3 + (14.774 \text{ kcal/m}^3 + 0.16ET+0.3ET)$$

Lo que despejando da $ET=576.922 \text{ kcal/m}^3$, que referido al kg de agua evaporada, en nuestro ejemplo, daría 1.125 kcal/kg ó 1,31 kwh/kg de agua evaporada.

Es importante tomar en consideración el hecho de que a esta cifra habrá que añadirle la energía imputable al proceso de calentamiento del secadero. Otro aspecto a considerar es que esta cifra corresponde a un dato de consumo de energía EN EL SECADERO, no en la caldera.

En la tabla 1 figuran los cálculos pormenorizados para cuatro especies de habitual empleo en la industria española. Es, sin embargo, necesario destacar que aunque para el cálculo de las pérdidas por calentamiento y humidificación del aire entrante y por convección se dan valores empíricos medios del 16% y del 30% de la Energía Total, respectivamente, estos datos varían con las distintas maderas. Esto se debe al hecho de que aún para el mismo espesor y aún considerando la necesidad de evaporar cantidades similares de agua, el secado de las maderas duras es más lento que el de las blandas, de ahí que las pérdidas por fugas y radiación sean, en valor absoluto y relativo, mayores en el primer caso que en el segundo. Lógicamente conforme más aislado y mejor regulado esté un secadero estas diferencias serán menores, aunque siempre existirán mientras exista la diferencia en duración del secado.

Otro aspecto interesante a tomar en consideración es que los datos de la tabla 1 no sirven para dimensionar correctamente tanto el sistema de calefacción del propio secadero como la potencia de la caldera será necesario ya que para ello será necesario conocer con exactitud cuál es la curva de secado o ritmo de pérdida de agua y/o humedad por hora. Aún cuando a igualdad de litros de agua evaporados la energía total sea, aproximadamente, la reflejada en la tabla 1, la demanda energética dependerá de la tasa de evaporación, expresada en litros/h.

BIBLIOGRAFÍA

- CULPEPPER, L.; 2000. Softwood drying. Enhancing kiln operations. Miller Freeman Books. ISBN 0-87930-581-9, 340 pp.
- ECKELMAN, C.A.; BAKER, J.L.; 1976. Heat and air requirements in the kiln drying of wood. Research Bulletin n° 933, Purdue Univ. Agricultural Experiment Station.
- FERNÁNDEZ-GOLFÍN SECO, J.I.; ÁLVAREZ NOVES, A.; 1998. Manual de secado de madera. Editorial AITIM. ISBN 84-87381-15-4, 169pp.
- JOLY, P.; MORE-CHEVALIER, F.; 1980. Théorie, pratique & économie du séchage des bois. Editions H. Vial, 91410 Dourdan, 204 pp.
- SKAAR, C. 1972. Water in wood. Syracuse Univ. Press. Syracuse, NY. 218 pp.
- SKAAR, C. 1977. Energy requirements for drying lumber.
- SHOTTAFFER, J.E.; SHULER, C.E.; 1974. Estimating heat consumption in kiln drying lumber. Tech. Bul. 73. Life Sci. and

Agric. Expt. State Univ. Maine, Orono, ME, 25 pg.
VILLIÈRE, A.; 1966. Le séchage des bois. Edit. Dunod.

Especie	Cálculo de EI								Cálculo de EE						Cálculo de ET			
	Hi (%)	Hf (%)	Dens _b (kg/m ³)	MV ₁ (kg)	EI ₁ (kcal/m ³)	MV ₂ (kg)	EI ₂ (kcal/m ³)	EI _T (kcal/m ³)	MV _T (kg)	Dens _v (kg/m ³)	Ti (°C)	Tf (°C)	Q _M (kcal)	EI+EE ₁ (kcal)	EE ₂ (kcal)	ET (kcal)	ET/kg (kcal/kg)	ET/kg (kwh/kg)
P.radiata	100	10	410	287	167895	82	49854	217749	369	820	20	80	15941	233690	199104	432794	1173	1,36
P.silvestre	100	10	430	301	129430	86	52286	181716	387	860	20	60	11146	192862	164318	357180	923	1,07
Roble	100	10	570	399	227430	114	69309	296739	513	1140	20	60	14774	311513	265409	576922	1125	1,31
Eucalipto	100	10	600	420	252000	120	72957	324957	540	1200	20	40	7776	332733	283488	616221	1141	1,33
$M_v = Dens_b \cdot V_i \cdot \frac{(H_i - H_f)}{100}$ $EE_2 = 0,852 \cdot (EI + EE_1) \quad ET = EI + EE_1 + EE_2$																		

Tabla 1.