

Balance de energía en un horno de secar madera

Balance of Energy in a Kiln of Drying Wood

MSc. Armando Rojas-Vargas, arojas@eros.moa.minem.cu

*Empresa de Servicios Técnicos de Computación, Comunicaciones
y Electrónica "Rafael Fausto Orejón Forment", Holguín, Cuba*

Resumen

Se determinaron las ecuaciones de balance de energía en un horno de secar madera y se calculó el consumo energético para tres valores de humedad inicial: 62, 72 y 82 % base seca. Las dimensiones de la cámara de secado son: 5,81 X 1,66 X 2,23 m (largo x alto x ancho), el volumen de madera, cedro blanco, es de $V=10,93 \text{ m}^3$. El mayor consumo energético se obtuvo en la etapa 1 donde se precalienta la madera y la estructura del horno desde sus condiciones iniciales hasta la temperatura de bulbo seco fijada, esta energía disminuye en la medida que decrece la humedad inicial y se debe utilizar para calcular el sistema de calentamiento. Las mayores fuentes de consumo de calor son: (1) el calor requerido para evaporar la humedad y romper los enlaces entre las fibras de madera y el agua; (2) el calor requerido para calentar el aire alimentado al horno para sustituir el aire húmedo que fluye en la cámara hasta la temperatura de bulbo húmedo fijada. Se establecieron siete recomendaciones para disminuir el consumo energético.

Palabras clave: secado de madera, balance de energía, horno de secado.

Abstract

The equations of energy balance were determined in a kiln of drying wood and the energy consumption was calculated for three values of initial moisture: 62, 72 and 82 % base dry. The dimensions of the drying chamber are: 5,81 X 1,66 X 2,23 m (Length X Height X Width), the wooden volume, white cedar, is of $V=10,93 \text{ m}^3$. The biggest energy consumption was obtained in the stage 1 where it is required to increase the kiln and lumber temperature from its initial values to the dry-bulb set-point temperature. This energy diminishes in the measure that the initial humidity falls and it should be used to calculate the heating device. The biggest sources of consumption of heat are: (1) the heat required to transform water into vapor and to break the bonds between wood fiber and absorbed water; (2) The heat required to warm up the fresh air fed from outside to the kiln, which is used to replace the moist air that flow inside the chamber to the wet-bulb set-point temperature. Seven suggestions to reduce the energy consumption were discussed.

Keywords: drying wood, balance of energy, furnace o drying.

Introducción

El proceso de secado de la madera consiste en la eliminación del agua en exceso del material recién cortado. El secado de la madera, disminuye los gastos de transportación; incrementa la estabilidad dimensional al controlar el encogimiento; aumenta la resistencia al ataque o crecimiento de microorganismos, hongos e insectos; mejora las propiedades mecánicas como la resistencia a la flexión, compresión y tracción; y permite dar un acabado de mayor calidad al producto.

El contenido de humedad de la madera puede existir como se relaciona a continuación: [3, 5, 6].

- a) Agua libre o capilar: Se refiere al agua contenida en las cavidades o lumen de la célula. Es de más fácil extracción. Al eliminarla no se presentan modificaciones apreciables en las propiedades físicas y mecánicas del leño y se llega a un nivel de humedad en base seca entre 28 % a 30 % en la madera. A este contenido de humedad se denomina Punto de Saturación de las Fibras (PSF).
- b) Agua latente (de impregnación, absorción, retenida o higroscópica): Es al agua que se encuentra adherida a las paredes celulares. Una vez iniciada la eliminación de esta forma de humedad a partir del PSF, se inician las modificaciones de las propiedades físicas y mecánicas de la madera.
- c) Vapor de agua en las cavidades celulares o lúmenes.
- d) Agua fija o de constitución: Es el agua que forma parte de la fibra de la madera por combinación química. La eliminación de la humedad por debajo del 8 %, implica la destrucción de la madera.

El secado agrupa algunas de las siguientes etapas según la calidad del producto y el programa de secado: Selección de la madera, apilado y enrastrelado, pretratamiento de la madera, secado al aire libre, secado al horno y almacenamiento.

La clasificación de la madera suele realizarse según la especie, espesor, humedad, tipo de madera y tipo de corte. El apilado y enrastrelado deben

cumplir ciertos requerimientos para evitar defectos en el producto. El secado al aire libre permite disminuir el costo energético del secado en cámaras. De acuerdo a la especie de madera, se aplica un programa de secado, este consta de varias fases como son: calentamiento, secado e igualación y acondicionamiento. El almacenamiento, como etapa final del proceso, debe garantizar preservar la calidad especificada para el producto. [3, 5, 6].

Los hornos de cámaras constan por lo general de los siguientes elementos: cámara de secado, sistema de aireación, calefacción, humidificación, deshumidificación y sistema de control automático.

El secado de madera en hornos de cámara consiste en hacer pasar aire por los sistemas de aireación, calefacción y humidificación para luego atravesar las pilas de madera. Mientras el aire circula entre la madera, absorbe humedad, aumenta la humedad relativa y disminuye la temperatura, debido a la transferencia de calor del aire a la madera. Cuando el aire termina este recorrido, se fuerza con los ventiladores a salir por las ventilas o compuertas de aireación y al mismo tiempo se alimenta aire del exterior a la cámara, originando un nuevo ciclo en el proceso de secado.

El objetivo del trabajo es determinar cuáles son las mayores fuentes de consumo de calor durante el proceso de secado de la madera así como la energía a considerar para el cálculo del medio de calentamiento.

Materiales y métodos

El horno de secar madera posee las dimensiones reflejadas en la tabla 1.

Tabla 1
Dimensiones del horno de secado

ITEMS	Horno	Cámara
Largo (m)	5,81	5,810
Alto (m)	2,26	1,660
Ancho (m)	2,23	2,230

La madera es de cedro blanco y posee como dimensiones 2,4 x 0,3048 x 0,0508 m (Largo x Ancho x Espesor); los separadores, 2,17 x 0,0508 x 0,0254 m; y una pila, 2,4 x 1,62 x 2,17 m. El volumen de madera alimentado es de $V=10,93 \text{ m}^3$.

En la tabla 2 se muestra el programa de secado por etapas (E_i) y las propiedades necesarias para los cálculos.

Tabla 2
Programa de secado del cedro. Propiedades del agua y aire

E_i	t (h)	X (%)		Tbs (°C)	Tbh (°C)	HR (%)	Y_i (kg/kg)	Hai (kJ/kg)	V_H (m ³ /kg)	ρ (kg/m ³)	λ_v (kJ/kg)
		X_{i-1}	X_i								
1	6,5	> 50	50	54,5	51,5	86	0,0929	314,47	1,066 3	1,024 4	2 378,8
2	36,8	50	40	54,5	50,5	81	0,086 8	298,45	1,057 1	1,027 5	-
3	13,8	40	35	54,5	48,5	71	0,074 8	267,22	1,039 2	1,033 6	-
4	8,17	35	30	54,5	46,0	62	0,064 3	240,01	1,023 4	1,039 1	-
5	8,17	30	25	60,0	49,0	55	0,075 3	275,04	1,057 5	1,102 6	2 361,0
6	12,62	25	20	65,5	51,5	49	0,088 0	314,44	1,094 4	0,993 5	2 346,9
7	12,62	20	15	71,0	54,5	43	0,100 1	352,91	1,131 3	0,971 8	2 340,5
8	15,4	15	8	82,0	54,5	26	0,095 3	353,21	1,159 6	0,943 9	2 314,7
Condiciones ambientales				28	-	70	0,017	89,45	0,876 0	1,160 3	-

La masa de aire húmedo en cada etapa de secado, se calcula por la ecuación (1), es la suma del aire seco más el agua contenida, e igual al producto del volumen de aire presente en la cámara por la densidad del aire húmedo.

$$M_{ai} = M_{ais} + M_a = V_{ai} \cdot \rho_{ai} \quad (1)$$

$$[kg] = [m^3] \cdot \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

La masa de aire seco se calcula como la masa húmeda entre el volumen húmedo (2).

$$M_{ais} = V_{ai} \cdot \frac{1}{V_H} \quad (2)$$

$$[kg]_{aireseco} = [m^3] \cdot \left[\frac{1}{\frac{m^3 \text{ mezcla}}{kg \text{ aireseco}}} \right]$$

La masa de madera húmeda es el producto del volumen de madera verde alimentada al horno de secado, por la densidad de la madera (volumen base verde) (3).

$$M_{mh} = V_m \cdot \rho_m \quad (3)$$

$$[kg] = [m^3] \cdot \left[\frac{m^3}{kg} \right]$$

La masa de madera seca (M_{ms}) se calcula como la diferencia entre la masa de madera húmeda (M_{mh}) y la masa de agua (M_a); la masa de agua, es el producto de la masa de madera húmeda por la humedad en base húmeda en la etapa (i) (4).

$$M_{ms} = V_m \cdot \rho_m \cdot (1 - X_i^*) \quad (4)$$

$$[kg] = [m^3] \cdot \left[\frac{m^3}{kg} \right]$$

El calor a suministrar al horno de secar madera debe suplir el calor necesario para:

Q_1 : Calentar la estructura del horno.

Q_2 : Calentar el aire del interior del horno.

Q_{3-4} : Calentar la madera húmeda.

Q_3 : Calentar la madera seca.

Q_4 : Calentar el agua contenida en la madera.

Q_5 : Evaporar el agua o humedad y desligar el agua de la madera, es decir el calor de vaporización y el calor diferencial de adsorción.

Q_6 : Suplir las pérdidas por convección, radiación y las fugas.

Q_7 : Calor necesario para calentar el aire de secado alimentado al horno, para mantener el equilibrio de humedad dentro de las especificaciones del programa de secado. Es el calor que se debe suministrar para suplir el calor que se

pierde por las ventilas con el aire caliente que se despoja de la cámara con exceso de humedad.

En la figura 1 se muestra el diagrama entalpía–temperatura del calentamiento, vaporización y adsorción del agua en cada etapa de secado.

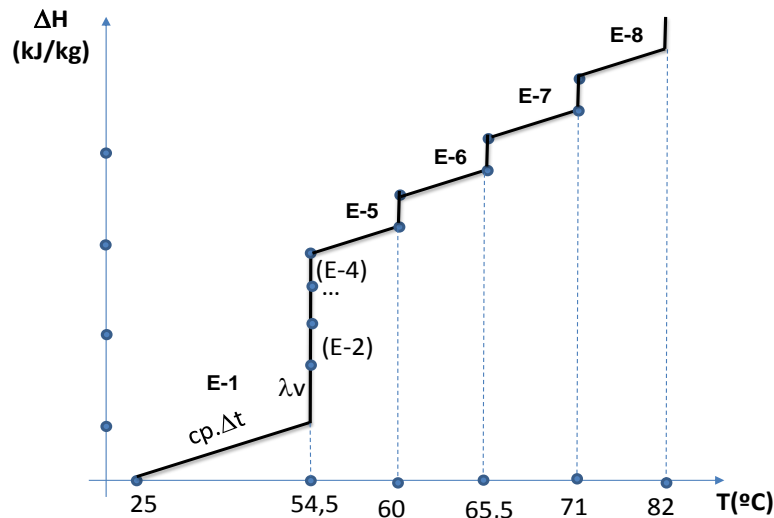


Figura 1. Diagrama entalpía-temperatura del agua

Las ecuaciones a aplicar se describen a continuación:

Q_1 : Calentar la estructura del horno. El calor absorbido por el aislante (as) interior del horno, en un gradiente de temperatura (ΔT) se determina por la ecuación (5). Se desprecia el calor absorbido por la pared metálica exterior del secador.

$$Q_1 = V_{as} \cdot \rho_{as} \cdot cp_{as} \cdot \Delta T \quad (5)$$

$$Q_1 = 2 \cdot \delta \cdot (L \cdot H + H \cdot A + L \cdot A) \cdot \rho_{as} \cdot cp_{as} \cdot \Delta T$$

$$[kJ] = [m^3] \cdot \left[\frac{kg}{m^3} \right] \cdot \left[\frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C} \right] \cdot [^\circ C]$$

donde

Volumen de aislante (V_{as}), espesor (δ), largo (L), alto (H), ancho (A)

Q_2 : Calentar el aire húmedo en el interior del horno. El calor absorbido por el aire húmedo del interior de la cámara, se calcula por la ecuación (6) utilizando la entalpía específica del aire húmedo.

$$Q_2 = \frac{V_{ai}}{V_H} \cdot (H_{ai} - H_{ai-1}) \quad (6)$$

$$[kJ] = \frac{\left[\frac{m^3}{m^3 \text{ mezcla}} \right]}{\left[\frac{kg \text{ aire seco}}{kg \text{ aire seco}} \right]} \cdot \left[\frac{kJ}{kg \text{ aire seco}} \right]$$

Q_{3-4} : Calentar la madera húmeda. El calor absorbido por la madera húmeda, para calentarse desde la temperatura (T_{i-1}) hasta la temperatura de operación (T_i) a la humedad inicial de la etapa (X^*_i) se calcula por la ecuación (7) y el calor específico por la ecuación (8).

$$Q_{3-4} = V_m \cdot \rho_m \cdot \overline{cp_{mY}} \cdot \Delta T \quad (7)$$

$$[kJ] = [m^3] \cdot \left[\frac{kg}{m^3} \right] \cdot \left[\frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C} \right] \cdot [^\circ C]$$

El calor específico de la madera húmeda (cp_{mY}) es mayor que el de la madera seca (cp_m). Debajo del punto de saturación de la saturación de las fibras, es la suma de la capacidad de la madera seca (cp_m) y la del agua (cp_a) y el factor de ajuste adicional (Ac) que considera la energía en el enlace agua–madera. /3/

$$cp_{mY} = \left(\frac{cp_m + 0,01 \cdot \overline{X}_i \cdot cp_a}{1 + 0,001 \cdot \overline{X}_i} \right) + Ac \quad (8)$$

donde

\overline{X}_i es la humedad promedio (%) en la etapa de secado y el calor específico del agua es de 4,19 kJ/kg.K. El factor de ajuste adicional (Ac) se puede calcular por la ecuación (9). /3/

$$Ac = \overline{X}_i \cdot (-0,06191 + 2,36 \cdot 10^{-4} \cdot \overline{T} - 1,33 \cdot 10^{-4} \cdot \overline{X}_i) \quad (9)$$

Donde la temperatura (\overline{T}), se refiere a la temperatura de bulbo seco promedio de la etapa, T_{bs} , en Kelvins y la humedad en porciento.

Las ecuaciones (9) y (10) son válidas bajo el punto de saturación de las fibras a temperaturas entre 7 °C y 147 °C. Para calcular el cp de la madera seca (cp_m), se aplica la ecuación (10). /3/

$$cp_m = 0,1031 + 0,003867 \cdot T \quad (10)$$

Donde la temperatura (T), se refiere a la temperatura de bulbo seco, Tbs, en Kelvins y calor específico de la madera seca (cp_m), kJ/kg-K.

Q_3 : Calentar la madera seca. El calor absorbido por la madera, para calentarse desde la temperatura (T_{i-1}) hasta la temperatura de operación (T_i) a una humedad inicial de la etapa (X^*_i), se calcula por la ecuación (11).

$$Q_3 = V_m \cdot \rho_m \cdot \left(1 - \frac{X^*_i}{100}\right) \cdot cp_m \cdot \Delta T \quad (11)$$

$$[kJ] = [m^3] \cdot \left[\frac{kg}{m^3}\right] \cdot \left[\frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}\right] \cdot [^\circ C]$$

Q_4 : Calentar el agua de la madera. El calor absorbido por el agua, para calentarse desde la temperatura (T_{i-1}) hasta la temperatura de operación (T_i) a una humedad inicial de la etapa (X^*_i) se calcula por la ecuación (12).

$$Q_4 = V_m \cdot \rho_m \cdot \frac{X^*_i}{100} \cdot cp_a \cdot \Delta T \quad (12)$$

$$[kJ] = [m^3] \cdot \left[\frac{kg}{m^3}\right] \cdot \left[\frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}\right] \cdot [^\circ C]$$

Q_5 : Calor de vaporización y desorción. El calor para vaporizar el agua encima del punto de saturación de las fibras ($X > 30\%$), se calcula por la ecuación (13).

$$Q_5 = V_m \cdot \rho_m \cdot \left(\frac{X^*_{i-1} - X^*_i}{100}\right) \cdot \lambda_v \quad (13)$$

$$[kJ] = [m^3] \cdot \left[\frac{kg}{m^3}\right] \cdot \left[\frac{kJ}{kg}\right]$$

Para calcular el calor de evaporación del agua (λ_v), se recomiendan las tablas termodinámicas Keenan o la ecuación combinada de Antoine para calcular la

presión de vapor del agua y la ecuación de Clausius - Clapeyron para determinar el calor de vaporización (14). /1, 2/

$$\lambda_v = \frac{B \cdot R \cdot T^2}{(T + C)^2} \quad (14)$$

donde

El calor de vaporización (λ_v) en (kJ/kg)

B=3 876,097 4; R, constante de los gases ideales igual a R=0,462 2 kJ/kg-K;
C=-43,232 4

Por debajo del punto de saturación de las fibras, la energía para la vaporización del agua es mayor que el calor latente de vaporización. Para los niveles de humedad menores de 20 %, el calor de adsorción aumenta exponencialmente con la disminución de la humedad de 20 a 0 %. Weichert propuso la ecuación (15) para calcular el calor diferencial de desorción: /3/

$$\Delta\lambda_a = \exp \left[-14,5 \cdot \frac{(X_{i-1} - X_i)}{100} + 6,18 \right] \quad (15)$$

donde

$\Delta\lambda_a$ Es el calor diferencial de adsorción (BTU/lb) (1 BTU/lb = 4,186 9 kJ/kg)

X: Humedad, en porciento.

Q_6 : Suple las pérdidas por convección y radiación. Se considera un 8 % de pérdidas de calor por radiación y convección a través de las paredes del horno ($Q_6 = 8 \% Q_R$)

$$Q_6 = \sum_{Q=1}^{Q=7} Q_i \quad (16)$$

Q_7 : Calor perdido por las ventilas. El aire en el interior de la cámara de secado absorbe la humedad que se evapora de la madera y para mantener la humedad relativa en la cámara como especifica el programa de secado, es necesario expulsar por las ventilas el exceso de humedad y a su vez, reincorporar a la cámara un flujo de aire de compensación. Esto incide en que haya pérdidas de calor con el aire húmedo que se expulsa, lo que se puede

disminuir instalando un equipo de transferencia de calor. El calor que se pierde se calcula por la ecuación (17).

$$Q = V_m \cdot \rho_m \cdot \left(\frac{X_i^* - X_{i-1}^*}{100} \right) \cdot \left(\frac{1}{Y_i - Y_{i-1}} \right) \cdot (H_{ai} - H_{ai-1}) \quad (17)$$

donde

H_{ai} (kJ/kg) es la entalpía específica

Y_{ai} la humedad del aire de las corrientes que salen y entran a la cámara

$$[kJ] = \underbrace{[m^3]}_{kg \text{ agua}} \cdot \left[\frac{kg}{m^3} \right] \cdot \left[\frac{1}{\frac{kg \text{ agua}}{kg \text{ aire seco}}_{descarga} - \frac{kg \text{ agua}}{kg \text{ aire seco}}_{ambiente}} \right] \cdot \left[\frac{kJ}{kg \text{ aire seco}} \right]$$

$$M_{ai} = V_m \cdot \rho_m \cdot \left(\frac{X_i^* - X_{i-1}^*}{100} \right) \cdot \left(\frac{1}{Y_i - Y_{i-1}} \right) \cdot V_H \quad (18)$$

$$[m^3]_{mezcla} = \underbrace{[m^3]}_{kg \text{ agua}} \cdot \left[\frac{kg}{m^3} \right] \cdot \left[\frac{1}{\frac{kg \text{ agua}}{kg \text{ aire seco}}_{descarga} - \frac{kg \text{ agua}}{kg \text{ aire seco}}_{ambiente}} \right] \cdot \left[\frac{m^3 \text{ mezcla}}{kg \text{ aire seco}} \right]$$

La masa de aire húmedo que sale se calcula por la ecuación (18)

donde

V_H : volumen húmedo (m^3 de mezcla / kg de aire seco) y dividido por el tiempo de operación, permite calcular el flujo a extraer.

El secado de la madera húmeda se puede considerar como un proceso de vaporización adiabática (humidificación) como el representado en la figura 2, donde el contenido de vapor en la mezcla gaseosa aumenta debido a la vaporización del líquido. Para verificar si el aire se satura o no de vapor; o alcanza una humedad superior a la establecida en la etapa de secado y por tanto, se requiere abrir las ventilas para evacuar el aire húmedo, se aplica la ecuación (19). /4/

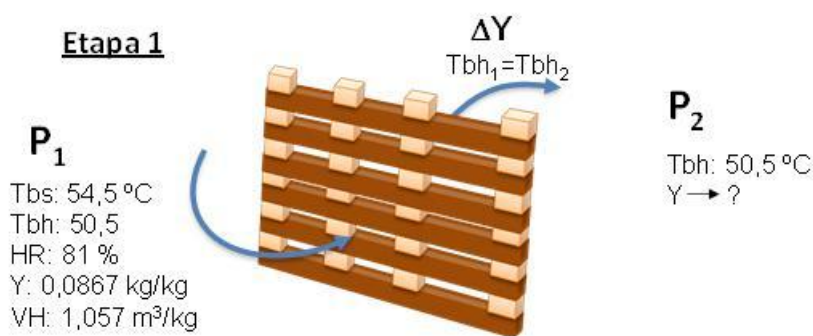


Figura 2. Representación de la vaporización adiabática del secado de la madera, etapa 1

Despejando de la ecuación (19) se puede calcular la humedad en el punto P₂, y con la temperatura de bulbo húmedo, se determina en la carta sicrométrica (u otra vía) la humedad relativa, la cual debe ser igual o inferior a la especificada para la etapa, o de lo contrario, se debe evacuar el aire húmedo por las ventilas.

$$W_{ai} \cdot \frac{1}{V_H} \cdot \Delta Y = W_a \quad (19)$$

$$\frac{\left[\frac{m^3}{h} \right] \cdot \left[\frac{kg \text{ agua}}{kg \text{ aire seco}} \right]}{\left[\frac{m^3 \text{ mezcla}}{kg \text{ aire seco}} \right]} = \left[\frac{kg}{h} \right]$$

Para calcular la densidad del cedro blanco, se aplicó la ecuación (20). /3/

Para una humedad inicial en base seca de 82,0 % (41,5 % en base húmeda), la densidad de la madera será:

$$\rho_{82\%} = \rho_a \cdot G_b \cdot \left(1 + \frac{X}{100} \right) \quad (20)$$

$$\rho_{82\%} = 1000 \cdot 0,31 \cdot \left(1 + \frac{82\%}{100} \right) = 564,2 \frac{kg}{m^3}$$

Resultados y discusión

En la figura 3 se muestra la potencia de secado calculada para tres condiciones de humedad inicial de la madera: 62, 72 y 82 % base seca. La potencia (P) se

calculó según la ecuación (21), el mayor consumo sucede en la etapa de calentamiento (E-1) y es menor en la medida que disminuye la humedad.

$$P_{Ei} = \sum_{i=1}^7 \left(\frac{Q_i}{t} \right) \quad (21)$$

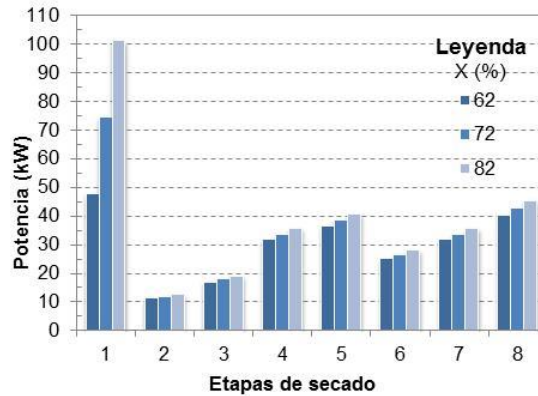


Figura 3. Potencia de secado

En la figura 4, se muestra el calor de secado (%) para las etapas 1, 5, 8, a una humedad inicial de la madera de 82 %, predominando el calor absorbido para la vaporización y desorción (Q₅) y las pérdidas por las ventilas (Q₇).

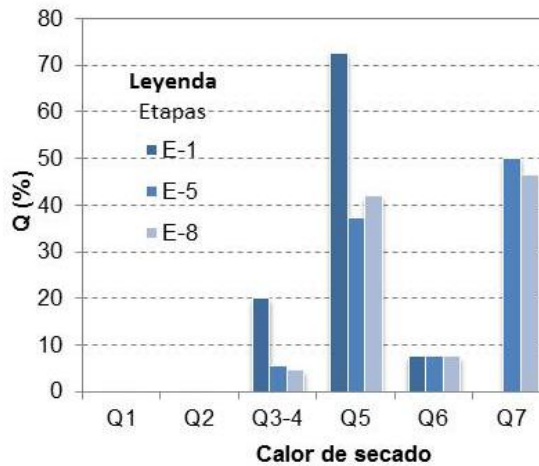


Figura 4. Calor absorbido en las etapas de secado. X=82 %

Para disminuir el consumo energético se establecen algunas recomendaciones:

Aplicar el secado solar para disminuir la humedad de alimentación de la madera y con ello, la energía necesaria para calentar el agua embebida en la madera (Q_{3-4}) y el calor para evaporarla (Q_5).

- Precalentar el aire de secado alimentado al horno, por transferencia de calor con el aire de salida y disminuir el calor perdido por las ventilas (Q_7).
- Reducir las pérdidas de calor por la estructura, puertas, garantizando buen estado del aislante térmico, adecuada hermeticidad; pintar las paredes metálicas exteriores de colores que absorban el calor (Q_6).
- Realizar el control automático del sistema para elevar la eficiencia energética y obtener un producto de mayor calidad, debe considerar los elementos: temperatura en la cámara y accionamiento sobre el medio de calentamiento; humedad relativa (o temperatura de bulbo húmedo) y accionamiento sobre la abertura de las ventilas y los humidificadores; velocidad y dirección del flujo de aire por accionamiento sobre los ventiladores; la humedad (o temperatura, según el proceso) en el corazón de la madera en las muestras de control; y supervisión y registro de los parámetros de secado.
- Revisar la instalación, disposición o estado técnico de los deflectores que permitan dirigir el flujo de aire en la cámara de secado y evitar zonas muertas.
- Verificar la correcta disposición de la madera en el horno de secado: Correcto apilado de la madera en cuanto al espacio libre entre la pila y el suelo, ancho de las pilas; grosor de los separadores de la madera y separación entre las tablas.
- Realizar la correcta selección de las muestras de control de humedad en la cámara e instalación de los instrumentos de medición.

Conclusiones

- 1. El mayor consumo energético para secar la madera en un horno de cámaras, se obtuvo en la etapa de calentamiento, siendo esta la energía a considerar para el cálculo del medio de calentamiento.**
- 2. Las mayores fuentes de consumo de calor son: (1) el calor requerido para evaporar la humedad y desligar el agua de la madera y (2) el calor perdido por las ventilas con el aire caliente que se despoja de la cámara.**

Nomenclatura

A : Ancho (m)

A_c : Factor de ajuste (adimensional)

G_b : Gravedad específica básica de la madera, masa de madera seca a la estufa u horno y volumen base madera verde

H Alto (m)

HR: Humedad Relativa (%)

H_{ai-1} : Entalpía del aire a la temperatura ambiente (kJ/kg)

H_{ai} : Entalpía del aire a la T_{bs} de la etapa i (kJ/kg)

L : Largo (m)

M_a : Masa de agua (kg)

M_{aiY} : Masa de aire húmedo (kg)

M_{ai} : Masa de aire (kg)

M_{ms} : Masa de madera seca (kg)

M_{mY} : Masa madera húmeda (kg)

P_{Ei} : Potencia en la etapa i (kW)

Q_i : Calor absorbido en la etapa i (kJ)

Tbs: temperatura de bulbo seco (°C)

Tbh: temperatura de bulbo húmedo (°C)

T_{i-1} : Temperatura inicial de la etapa (°C)

T_i : Temperatura final de la etapa (°C)

\bar{T} : Temperatura promedio (°C)

t_i : Intervalo de tiempo de una etapa E_i (s)

V_{as} : Volumen de aislante (m³)

V_{ai} : Volumen de aire húmedo (m³)

V_H : Volumen húmedo del aire (m³/kg)

V_m : Volumen de madera verde (m³)

X_i : Humedad base seca de la etapa i (%)

X_{i-1} : Humedad base seca de la etapa anterior i-1 (%)

\bar{X} : Humedad base seca promedio (%)

X_i^* : Humedad base húmeda de la etapa i (%)

X_{i-1}^* : Humedad base húmeda de la etapa anterior i-1 (%)

Y_i : Humedad del aire a la Tbs en la etapa i, (kg agua/kg aire)

Y_{i-1} : Humedad del aire ambiente a la Tbs, (kg agua/kg aire)

δ : Espesor del aislante (m)

ρ_{as} : Densidad del aislante (kg/m³)

ρ_m : Densidad de la madera, volumen base verde (kg/m³)

\overline{cp}_a : Calor específico del agua (kJ/kg°C)

\overline{cp}_{as} : Calor específico del aislante (kJ/kg°C)

\overline{cp}_m : Calor específico de la madera seca (kJ/kg°C)

$\overline{cp}_{m\gamma}$: Calor específico de la madera húmeda (kJ/kg°C)

λ_v : Calor de vaporización a T_i (kJ/kg)

$\Delta\lambda_a$: Calor de desorción (kJ/kg)

ΔT : Diferencia de temperatura (°C)

Bibliografía

1. H. KEENAN, J. Steam Tables and Mollier Diagram. La Habana: Instituto del Libro, p 50. 1970 .
2. RÍOS A., L.G. Determinación del calor de vaporización del agua. Scientia et Technica, [S.I.], Vol. 3, No. 49, p. 163 - 166, 2011. ISSN 0122-1701. Disponible en: <<http://revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/view/1507>>. Fecha de acceso: 26 octubre 2014. Colombia.
3. Handbook of wood, 2010. United States Department of Agriculture Forest Service• Madison, Wisconsin. Centennial Edition. 590 p. Disponible en: http://www.woodweb.com/Resources/wood_eng_handbook/wood_handbook_fpl_2010.pdf. Fecha de acceso: 26 octubre 2014.
4. CRUZ VIERA, L.; PONS HERNÁNDEZ, A. Introducción a Ingeniería Química. La Habana: Pueblo y Educación, Cuba. 1985. SNCC: RA01.46001.3, p 390
5. VISCARA Silverio. Guía para el secado de la madera en hornos. Proyecto de Manejo Forestal Sostenible BOLFOR. Documento Técnico 69/1998. USAID/Bolivia. 64 p. Disponible en: <http://ritim.org.ar/espanol/Descargas/i007.pdf> Fecha de acceso: 26 octubre 2014.
6. GARCÍA, L. O.; ESPINOZA, J. J. R.; RIVAS, D. M. Manual para el participante tecnología de la madera y materiales. 56 p. Nicaragua. Disponible en:
7. <http://www.mific.gob.ni/Portals/0/Documentos%20Industria/MANUAL%20de%20Tecnologia%20de%20la%20madera%20%28Reparado%29.pdf>. Fecha de acceso: 26 octubre 2014.