

## EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN LOS HORNOS TRADICIONALES DE CURADO DE TABACO\*

NÉSTOR-ENRIQUE CERQUERA PEÑA<sup>1</sup>

EDUARDO PASTRANA BONILLA<sup>2</sup>

### RESUMEN

El cultivo del tabaco se ha convertido en uno de los más importantes en Colombia, generando empleo a mano de obra calificada y no calificada. En la poscosecha del tabaco se han detectado varias problemáticas a resolver, una de ellas la concerniente al alto costo del combustible empleado en los hornos de curado. Por ello, se realizó una evaluación al intercambiador de calor tradicional tipo hornilla para determinar la eficiencia en el uso del combustible. La información obtenida deja en evidencia la gran dificultad que se tiene con este sistema de transferencia de calor por convección natural para mantener temperaturas estables al interior del horno, generando condiciones ambientales que se alejan considerablemente de las previstas para este proceso, dependiendo estas variaciones, en gran medida, de la frecuencia de cargue de la hornilla, encontrándose además, que la eficiencia en el aprovechamiento de la energía entregada por el carbón es menor del 10 %.

**PALABRAS CLAVES:** curado de tabaco; intercambiador de calor; eficiencia térmica; horno.

## EVALUATION OF ENERGY EFFICIENCY IN TRADITIONAL TOBACCO CURING OVENS

### ABSTRACT

Tobacco has become one of the most important crops in Colombia, generating employment for both skilled and unskilled workers. In the post-harvesting of tobacco were found several problems to be solved, one of them concerning the high cost of the fuel used in the curing ovens. Therefore, an evaluation to the traditional heat exchanger, burner type, to determine the efficiency of the fuel used, was performed. The information obtained shows clearly the great difficulty that we have with this system of heat transfer by natural convection to maintain stable temperatures inside the oven, creating environmental conditions that deviate significantly from those required for this process, depending these variations largely on the frequency of loading of the burner, we also found that the use efficiency of the energy delivered by coal is less than 10 %.

**KEYWORDS:** Tobacco Curing; Heat Exchanger; Thermal Efficiency; Oven.

\* Trabajo realizado con el apoyo y financiación de la Gobernación del Huila, la Secretaría de Agricultura y Minería del Huila y la Universidad Surcolombiana.

<sup>1</sup> Ingeniero agrícola. MsC en Ingeniería Agrícola UN. MsC en Dirección Universitaria, Especialista en Ciencia y Tecnología de Alimentos UN. Profesor Titular, Facultad de Ingeniería, Universidad Surcolombiana.

<sup>2</sup> Ingeniero agrícola. PhD. en Ciencias y Tecnología de Alimentos. MsC. en Ciencia de los Alimentos y Enología. Profesor Titular, Facultad de Ingeniería, Universidad Surcolombiana.



*Autor de correspondencia:* Cerquera-Peña, N.E. (Néstor Enrique). Avenida Pastrana Borrero, Carrera 1, Neiva Universidad Surcolombiana, (Huila, Colombia). Tel: (578) 8 75 47 53. Correo electrónico: cerquera@usco.edu.co.

#### *Historia del artículo:*

Artículo recibido: 5-IV-2013 / Aprobado: 16-IX-2014  
Disponible online: 30 de diciembre de 2014  
Discusión abierta hasta diciembre de 2015



# AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NOS FORNOS TRADICIONALES DE CURA DE TABACO

## RESUMO

O cultivo de tabaco tornou-se um dos mais importantes na Colômbia, criando postos de trabalho para mão de obra qualificada e não qualificada. Em pós-colheita do tabaco se tem identificaram vários problemas a serem resolvidos, um delas ao relativo ao elevado custo do combustível utilizado nos fornos. Portanto, realizou se uma avaliação tradicional ao intercambiador de calor tradicional tipo hormilla para determinar a eficiência do tipo de combustível. A informação obtida mostra claramente a grande dificuldade que temos com este sistema de transferência de calor por convecção natural para manter as temperaturas estáveis no interior do forno, a criação de condições ambientais que se desviam significativamente daquelas exigidas para este processo, dependendo destas variações em em grande medida, a frequência da carga do queimador também descobriu que a eficiência na utilização da energia fornecida pelo carvão é inferior a 10 %.

**PALAVRAS-CHAVE:** Rapé cura; Trocadores de calor; Fornos; Eficiência térmica.

## 1. INTRODUCCIÓN

El tabaco, por más de un siglo, ha estado ligado a la vida de los colombianos en los aspectos económico, cultural y social. En Colombia, como en muchos países del mundo, el tabaco es un importante generador de empleo e ingreso para los agricultores, a la vez que constituye una fuente importante de recursos fiscales y de divisas. Además, la industria del tabaco dinamiza la economía a través de su encadenamiento con otros sectores como el transporte, la industria de cartón (por el uso de empaques), la industria gráfica, la de publicidad, mercadeo y medios de comunicación (por la alta inversión que hace este sector para promocionar sus productos) (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2005).

Para el caso del Huila, el sector tabacalero se ha caracterizado por mantenerse estable durante las épocas de crisis del sector agrícola en Colombia, y en los últimos años ha tenido un repunte con el consiguiente incremento de las áreas sembradas. Sin embargo se han detectado etapas en el proceso de la cosecha y la poscosecha que generan altas pérdidas económicas a los productores. En la fase de cosecha se provocan pérdidas por parte de los recolectores al no tener la capacitación adecuada para ello o al no aplicar dichos conocimientos a su labor. En la fase de curado de la hoja de tabaco se han detectado deficiencias en la construcción de los hornos, en el uso del combustible, en el control al proceso de curado y en la selección final del material seco, lo que demerita la calidad del producto

a comercializar y por lo tanto el valor de la transacción final. En términos generales, por curación se entiende los cambios sufridos por las hojas recién cosechadas a ciertas condiciones de temperatura, humedad y tiempo. Es un proceso vital que cae, por tanto, dentro de los fenómenos de la senescencia o inanición de las hojas recién cortadas. El propósito del curado es producir una hoja seca de adecuadas propiedades físicas y de composición química equilibrada, para que satisfaga al fumador (Coltabaco S.A., 2007). En este proceso la hoja pierde su contenido de humedad desde un 90 % hasta un 15 % aproximadamente.

Para realizar el curado, el calor es producido en estufas u hornillas y distribuido en todo el interior del horno y, con ayuda de los sistemas de ventilación, el aire caliente va retirando la humedad de la hoja. Además, en su interior el horno posee una estructura formada por vigas o barrederas que sirven de soporte a los cujes cargados con hojas listas para iniciar el proceso de curación (SENA Regional Santander, 2005). Los hornos convencionales o tradicionales son los más utilizados en Colombia y generalmente se construyen con dimensiones de 6m x 6m x 6m ó de 7m x 7m x 7m para una capacidad promedio de curado de 700 Kg. de tabaco seco por horneada (**Figura 1**). Se considera que un horno de estas dimensiones es suficiente para curar y secar la producción de tabaco de 2,5 hectáreas de cultivo (SENA Regional Santander, 2005).

La relación entre la cantidad de calor efectivamente utilizada para la evaporación y la cantidad de calor utilizada se define como eficiencia térmica. En equipos secadores de granos bien diseñados se obtienen eficiencias de aproximadamente 60 % a 65 % (Castillo, 1984). Zamora, *et al.*, 2005, realizaron el análisis técnico de las variantes de operación de un calentador de aire tubular (CAT) empleado para secar café, en el que inicialmente se aprovechaba solamente el 0,4 % de la energía que se desprende de la combustión, logrando elevar esta eficiencia hasta el 10,5 %, considerada por ellos como la máxima eficiencia de transferencia de calor en el CAT.

Para el caso de intercambiadores utilizados con quemadores de combustibles líquidos (Roa, *et al.*, 1999), se tiene lo siguiente:

- Un intercambiador con superficie aletada permite fácilmente obtener un 50 % de eficiencia
- Con los intercambiadores sin aletas rara vez se obtienen eficiencias superiores al 40 %
- Para la quema de coque, en general, los caficultores utilizan equipos que tienen eficiencia baja, máxima de 30 %

Altobelli (2010), en la evaluación energética realizada a una estufa *bulk-curing* para el curado de tabaco, encontró que su eficiencia energética fue del 29,21 %, la que se considera baja. Cerquera y Ruiz, 2007, empleando un intercambiador de calor con aire forzado que utiliza como combustible carbón mineral o cisco de café, encontraron que las eficiencias del uso del combustible en las etapas de curado de tabaco tipo Virginia, fueron, utilizando como combustible cisco de café: en la etapa de amarillamiento 70 %, en fijación de color 66 % y en secado de vena 69 %; y empleando carbón mineral: en la etapa de amarillamiento 67 %, en fijación de color 63 % y en secado de vena 74,2 %.

Según De Castro (1995), el proceso de curado en secaderos de tabaco Virginia es, entre los procesos de secado de productos agrícolas, el que más energía utiliza. Además, Según Ryan, *et al.* (1988) citado por De Castro (1995), mientras el secado de granos suele consumir 7 litros de gasóleo por tonelada de producto seco, el curado de tabaco consume 670 litros por tonelada del producto ya curado. Según Suggs (1992), citado por De Castro (1995), el curado de tabaco Virginia es

particularmente un proceso de consumo intensivo de energía a causa del alto contenido de humedad de las hojas (80-90 % base húmeda) cuando son introducidas en el secadero. Por lo tanto, la cantidad de agua que hay que eliminar del producto durante el proceso es muy importante: alrededor de 5 a 10 kg de agua deben ser evaporados por cada kilogramo de tabaco curado.

Esto cobra mayor relevancia por el número de hornos tradicionales existentes que para el departamento del Huila supera los quinientos (500) (Caicedo, 2005) y representan una inversión económica significativa. Por lo anterior, en este trabajo de investigación, que fue de tipo exploratorio, se determinaron y cuantificaron variables del proceso de curado que permitieron establecer en qué medida se aprovecha la energía entregada por el combustible durante el proceso de curado en los hornos tradicionales de curado de tabaco.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

La evaluación se llevó a cabo en los municipios de Campoalegre y Garzón en el departamento del Huila. En total se trabajó en tres baterías de hornos, una en Campoalegre y dos en Garzón, evaluándose en total nueve hornos. En cada uno de los hornos se realizaron lecturas de las siguientes variables, en intervalos de dos horas, durante todo el tiempo de curado así:

- Seguimiento a las temperaturas de la superficie en seis puntos del tubo intercambiador de calor y en un punto a la salida de los gases de combustión hacia la chimenea, con ayuda de termocuplas Extech EA 15 con sonda de superficie tipo K, y termómetros de vidrio, como se observa en la **Figura 1**.
- Lecturas de las temperaturas de bulbo seco y de bulbo húmedo con un sicrómetro de mecha.
- Lecturas de la humedad relativa.
- Cuantificación del consumo de combustible y seguimiento a los tiempos de cargue de combustible a la hornilla por parte de los operarios (horneros).

### Cálculo de la energía entregada por convección natural al ambiente interior del horno por el intercambiador de calor

Para calcular la energía que entrega el intercambiador al ambiente se utilizó la **Ecuación 1**, cuyo coeficiente de película para convección natural fue estimado

con ayuda de las ecuaciones 2, 3, 4, y 5 (Holman, 1996). Con los valores encontrados se obtuvo la energía transmitida por unidad de longitud del intercambiador de calor hacia el ambiente interno del horno (**Ecuación 6**).

$$Q_{\text{convección}} = hcA(T_w - T_{\infty}) \quad (1)$$

Donde:

$Q_{\text{convección}}$ : Energía por convección que es entregada por el intercambiador de calor al ambiente en W

$h_c$ : Coeficiente de transferencia de calor convectivo en  $W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$

A: Área de la superficie del tubo intercambiador de calor en  $m^2$

$T_w$ : Temperatura de superficie del intercambiador en  $^\circ C$

$T_{\infty}$ : Temperatura promedio del ambiente interior en  $^\circ C$

Las temperaturas promedio de la superficie ( $T_w$ ) y del ambiente ( $T_{\infty}$ ) corresponden a las lecturas realizadas en los puntos de medición del intercambiador de calor y del ambiente interior del horno en las tres etapas de curado.

El coeficiente de película por convección natural para cada una de las etapas de curado fue calculado aplicando el siguiente procedimiento:

$$GrPr = \frac{g\beta(T_w - T_{\infty}) d^3 Pr}{\nu^2} \quad (2)$$

Donde:

Gr: Número de Grashof

Pr: Número de Prandtl

g: Aceleración gravitacional ( $m \cdot s^{-2}$ )

$\beta$ : Coeficiente de expansión térmica del aire ( $K^{-1}$ )

d: Diámetro de la tubería del intercambiador(m)

$\nu$ : Viscosidad cinemática del aire ( $m^2 \cdot s^{-1}$ )

La temperatura de película absoluta se halla aplicando la siguiente ecuación:

$$T_f = \frac{T_w + T_{\infty}}{2} + 273 \quad (3)$$

Donde:

$T_f$ : Temperatura de película (K)

$T_w$ : Temperatura de la superficie del tubo del intercambiador de calor ( $^\circ C$ )

$T_{\infty}$ : Temperatura del aire circundante ( $^\circ C$ )

El módulo de Nusselt se calcula con la siguiente ecuación:

$$Nud = c(GrPr)^m \quad (4)$$

Donde:

Nud: número de Nusselt

c y m: Constantes para usarse en la **Ecuación 4** (Holman, 1996)

Calculado Nud se halla el coeficiente de transferencia de calor con la **Ecuación 5**:

$$hc = \frac{k \times Nud}{d} \quad (5)$$

Donde:

k: Conductividad térmica. ( $W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$ )

d: diámetro del tubo del intercambiador (m)

La energía transmitida por unidad de longitud del intercambiador de calor hacia el ambiente interno del horno se obtiene aplicando la **Ecuación 1**:

$$\frac{Q}{L} = h_c \pi d (T_w - T_{\infty}) \quad (6)$$

L: Longitud total del tubo intercambiador de calor (m)

### Cálculo de la energía requerida en cada fase del curado

Para calcular la energía necesaria para calentar el ambiente del recinto en el paso de una fase de curado a otra, y de la energía requerida para mantener las condiciones de temperatura y humedad en un valor medio en cada una de ellas, se utilizó la siguiente ecuación:

$$Q = mV (h_2 - h_1) \quad (7)$$

Donde:

Q: Energía necesaria para cambiar de fase de curado por unidad de tiempo ( $kJ \cdot h^{-1}$ )

m: Masa específica del aire seco ( $kgAs \cdot m^{-3}$ )

V: Volumen del aire a calentar en el horno por unidad de tiempo ( $m^3 \cdot h^{-1}$ )

$h$ : Entalpía del aire ( $\text{kJ} \cdot \text{kgAs}^{-1}$ )

Por psicrometría se determinó la entalpía y la masa específica del aire en el sistema, utilizando las temperaturas del ambiente y las humedades relativas promedio.

El volumen de aire que se desplaza a través de las hojas de tabaco en el horno se determinó considerando el espacio libre en la zona inferior y superior del recinto y el espacio entre las hojas de tabaco, este movimiento ascendente se da debido principalmente al cambio de densidad del aire y a la apertura y cierre de las compuertas localizadas a nivel piso y en la cumbre del techo.

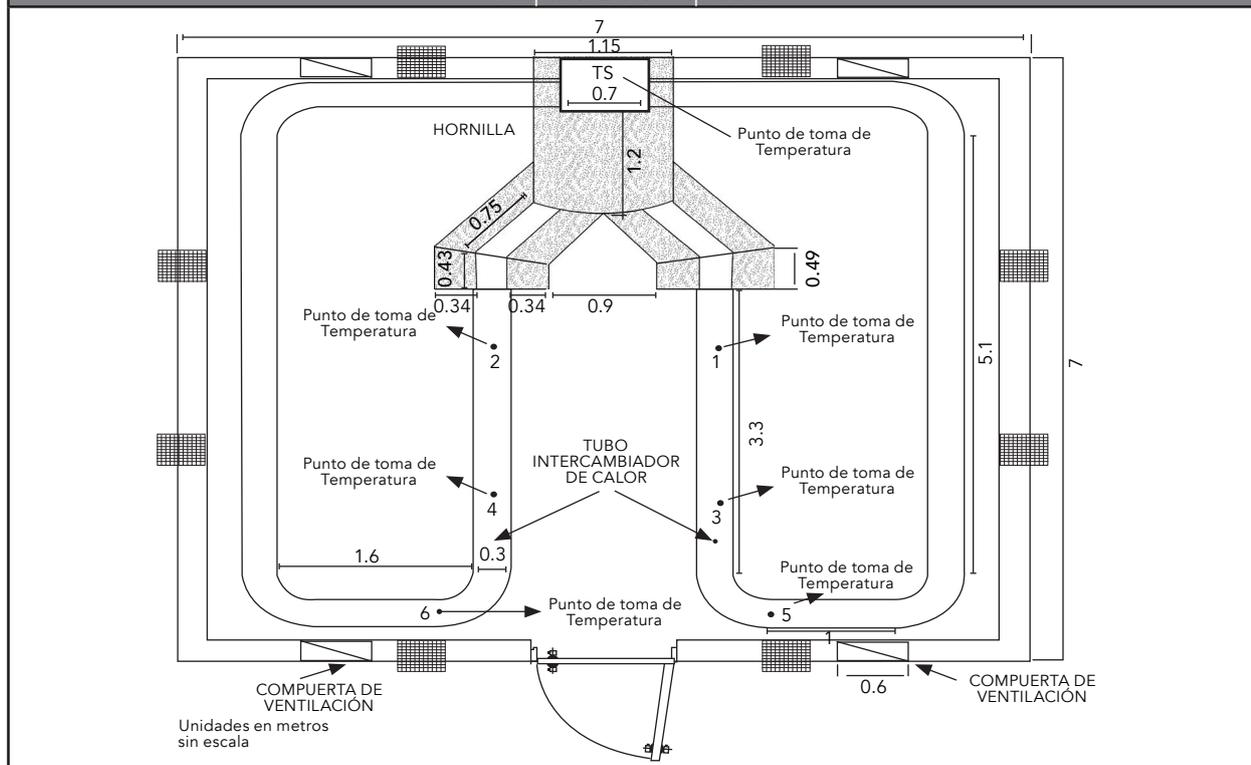
La eficiencia del intercambiador de calor ( $\eta_1$ ) se calculó estableciendo la razón entre la energía entregada por el intercambiador de calor por convección natural al ambiente (Tabla 8) respecto a la energía total generada en la hornilla por la combustión del carbón (Tabla 6).

La cuantificación de la energía utilizada para el calentamiento del aire, para la etapa de calentamiento del aire hasta la temperatura propia de cada fase de curado ( $\mathcal{E}_1$ ), se calculó como la razón entre la energía

empleada en el calentamiento inicial de cada fase de curado (Tabla 10) respecto a la energía total generada en la hornilla por la combustión del carbón (Tabla 6); y para la etapa de mantenimiento de la temperatura media de cada fase de curado ( $\mathcal{E}_2$ ) se calculó como la razón entre la energía empleada para mantener la temperatura media del horno (Tabla 12) respecto a la energía total generada en la hornilla por la combustión del carbón (Tabla 6).

La cuantificación de la energía transmitida por el intercambiador de calor por convección natural para el calentamiento del aire, en la etapa de calentamiento del aire hasta la temperatura propia de cada fase de curado ( $\mathcal{E}_3$ ), se calculó como la razón entre la energía empleada en el calentamiento inicial de cada fase de curado (Tabla 10) respecto a la energía entregada por el intercambiador al ambiente (Tabla 8) y para la etapa de mantenimiento de temperatura media de cada fase de curado ( $\mathcal{E}_4$ ), se calculó como la razón entre la energía empleada para mantener la temperatura media en el horno (Tabla 12) respecto a la energía entregada por el intercambiador al ambiente (Tabla 8).

Figura 1. Vista en planta del horno tradicional de tabaco y ubicación de los puntos de medición de la temperatura de superficie

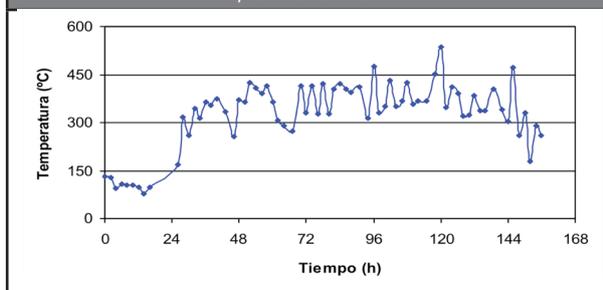


### 3. RESULTADOS

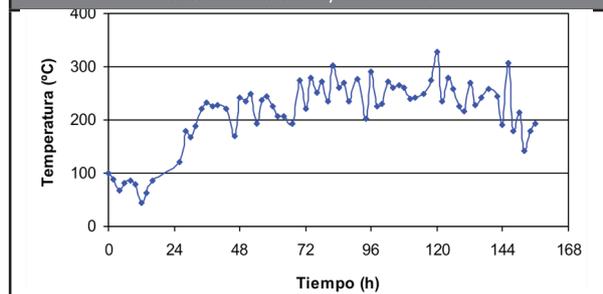
#### Comportamiento de la temperatura en la superficie del intercambiador de calor

En las **Figuras 2 y 3** se presentan las curvas que reflejan el comportamiento de la temperatura en

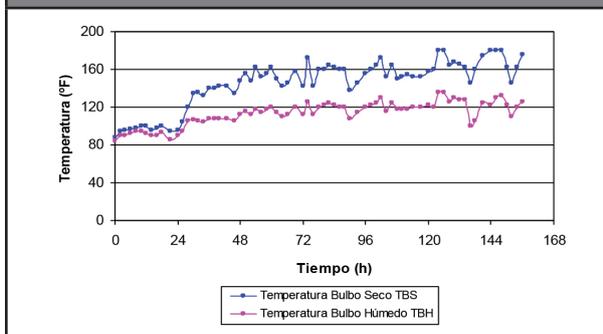
**Figura 2.** Comportamiento de la temperatura de superficie del intercambiador de calor en función del tiempo en el punto de medición 1, del horno N° 1, de la finca 3



**Figura 3.** Comportamiento de la temperatura de superficie del intercambiador de calor en función del tiempo en el punto de medición 3, del horno N° 1, de la finca 3



**Figura 4.** Variación de las temperaturas de bulbo seco y bulbo húmedo respecto al tiempo en el horno N° 1 de la finca 3



diferentes puntos de medición (**Figura 1**) del horno N° 1 de la finca 3. En ellas se puede observar la alta variabilidad que tiene la temperatura en la superficie del intercambiador durante las diferentes etapas del curado, dejando en evidencia la dificultad que tiene este sistema para generar condiciones estables de temperatura en el recinto. Se observa también el efecto que tiene la alimentación discontinua de combustible teniéndose picos de temperatura elevada cuando se alimenta la hornilla y reducciones considerables de la misma cuando no se hace la alimentación en el momento adecuado, llegando en ocasiones a apagarse, lo que puede acarrear daños graves al producto.

En la **Tabla 1** se presenta la temperatura promedio obtenida en cada uno de los puntos de medición, para cada etapa del proceso de curado. Esta información es utilizada para el cálculo de la eficiencia del uso de combustible en el intercambiador de calor.

Las mediciones de las temperaturas en los diferentes puntos a lo largo del intercambiador de calor permitieron observar que la misma decrece a medida que se aleja de la hornilla, encontrándose temperaturas altas al inicio de la tubería, puntos 1 y 2 (**Figura 1**), y menores en los puntos 5 y 6. La disminución de la temperatura desde la salida de la hornilla (valor medio de los puntos de medición 1 y 2) y los puntos de medición más alejados (valor medio de los puntos de medición 5 y 6), en cada una de las etapas de curado fue la siguiente: en amarillamiento de 11,5 °C, en fijación de color de 81,5 °C y en secado de vena de 95,5 °C.

En los puntos de medición equidistantes, en cada uno de los ramales del intercambiador, se observaron diferencias en la temperatura, lo que se refleja en un calentamiento desuniforme de la hoja de tabaco (**Figura 1**).

#### Comportamiento de las condiciones ambientales en el interior del horno de curado

La **Figura 4** representa el comportamiento de las temperaturas de bulbo seco y bulbo húmedo. En ella se puede apreciar la variación permanente que tiene la temperatura en el interior del horno, esto refleja la influencia que tiene el suministro del combustible a la hornilla en las variables de curado.

En los hornos evaluados la temperatura promedio que se maneja para cada etapa es cercana a los patrones recomendados por las empresas comerciali-

**Tabla 1.** Temperaturas promedio en los puntos de medición del Intercambiador de calor para cada fase del curado en el horno N° 1, de la finca 3

Puntos de Medición	Temperaturas promedio de los puntos de medición del intercambiador °C		
	Amarillamiento	Fijación de color	Secado de vena
TS	106	217	243
1	104	308	366
2	107	305	361
3	77	196	241
4	85	218	270
5	82	168	208
6	89	213	262

**Tabla 2.** Temperaturas promedio de bulbo seco en los hornos evaluados

Finca	Horno	Temperatura promedio de bulbo seco (°C)		
		Amarillamiento	Fijación de color	Secado de vena
1	2	38	54	67
	5	39	57	72
2	1	33	55	68
	2	34	54	70
3	0	36	44	67
	1	36	56	71
	3	37	56	72
	4	39	54	73
	5	38	52	73
<b>Promedio</b>		<b>37</b>	<b>54</b>	<b>70</b>
<b>Patrones</b>		<b>38</b>	<b>60</b>	<b>71</b>

zadoras de tabaco (SENA, 2005), como se observa en la **Tabla 2**; sin embargo, en la práctica se encuentran picos máximos y mínimos de temperatura que se alejan en gran medida del valor indicado (**Tabla 3**).

**Patrones:** Temperaturas sugeridas por las empresas productoras para cada una de las etapas del curado de tabaco (SENA; 2005).

El horno N° 5 de la finca 1 y los hornos N°4 y N° 5 de la finca 3 presentaron las temperaturas más elevadas en todas las etapas del curado de tabaco, sobrepasando los límites de las temperaturas recomendadas, principalmente en las etapas de amarillamiento y de secado de vena. Esto se puede ver reflejado en la reducción de la calidad del producto final. Para citar un ejemplo, en el horno 2 de la finca 1, la temperatura de bulbo seco sobrepasó los 71 °C sugeridos en la etapa de secado de vena llegando hasta los 88 °C.

### Tiempo de curado

La **Tabla 4** permite observar la variación en el tiempo empleado para cada una de las etapas de curado en las baterías de hornos evaluadas. En la fase de fijación de color, que en teoría debe ser de 36 a 48 horas, se presentaron casos en que esta etapa fue de tan solo 12 a 14 horas. Esta reducción en los tiempos de fijación de color se vieron reflejados en un incremento en el tiempo utilizado para el secado de vena, llegándose a tener espacios de hasta 122 horas cuando lo recomendado es de 40 a 60 horas, con el consiguiente sobrecosto en el uso de combustible y en la reducción de la calidad de la hoja.

La etapa de amarillamiento no se puede analizar de la misma forma, por cuanto en algunas ocasiones se realiza a temperatura ambiente y con las compuertas de ventilación cerradas durante varios días, procedimiento que incide directamente en esta etapa al no utilizar energía térmica del intercambiador de calor durante una parte de este periodo.

### Consumo de combustible y energía generada en la hornilla en las etapas de curado

En la **Tabla 5** se presentan los consumos promedio de combustible para cada fase del curado de tabaco. Para determinar la energía generada en la hornilla durante cada fase de curado se tuvo en cuenta el poder calorífico del carbón que se consume en la zona de estudio y la cantidad promedio de combustible que se emplea durante cada fase de curado (**Tabla 6**).

φ Poder calorífico del carbón de 29.56 MJ\*kg<sup>-1</sup> (Ingeominas, 2005).

**Tabla 3.** Temperaturas mínimas y máximas de bulbo seco en los hornos evaluados

Finca	Horno	Temperaturas mínimas y máximas de bulbo seco (°C)					
		Amarillamiento		Fijación de color		Secado de vena	
		Tmin	Tmax	Tmin	Tmax	Tmin	Tmax
1	2	34	44	52	62	48	88
	5	33	39	46	62	51	81
2	1	31	33	45	61	61	74
	2	30	43	43	62	63	78
3	0	32	38	39	56	54	82
	1	31	38	40	61	59	82
	3	34	40	40	66	62	82
	4	36	41	43	62	58	82
	5	34	41	42	61	54	87

**Tabla 4.** Tiempo empleado en cada etapa del curado

Finca	Horno	Tiempo empleado por etapas (h)		
		Amarillamiento	Fijación de color	Secado de vena
1	2	20	28	46
	5	16	26	43
2	1	13	36	54
	2	67	51	49
3	0	20	12	121
	1	24	22	110
	3	48	22	122
	4	26	22	104
	5	16	14	93

**Tabla 5.** Consumo promedio de carbón en las fases del curado

Fase	Consumo de Carbón (kgx*h <sup>-1</sup> )
Amarillamiento	7
Fijación color	12
Secado Vena	18

#### Cálculo de la energía entregada por convección natural al ambiente interior del horno por el intercambiador de calor

Para calcular la energía entregada por el intercambiador de calor al ambiente se utilizaron las ecuaciones 1 a 5. Las temperaturas promedio de la superficie ( $T_w$ ) y del ambiente ( $T_\infty$ ) se obtuvieron de las lecturas realizadas en los puntos de medición del intercambiador de calor y del ambiente interior del horno en las tres etapas de curado, estos valores se presentan en la **Tabla 7**:

Los valores calculados para el calor transferido por el intercambiador de calor en las etapas de amarillamiento, fijación de color y secado de vena se presentan en la **Tabla 8**.

#### Cálculo de la energía empleada para iniciar cada fase del curado y de la energía necesaria para mantener la temperatura promedio del ambiente interno

La energía necesaria para calentar el ambiente del recinto en el inicio de cada fase de curado se calculó con la **Ecuación 6**, utilizando las temperaturas promedio del ambiente (**Tabla 7**) y las humedades relativas promedio que se muestran en la **Tabla 9**.

**Tabla 6.** Energía generada ( $Q_t$ ) por la combustión del carbón en la hornilla<sup>φ</sup>

Fase	$Q_t$ (MJ*h <sup>-1</sup> )
Amarillamiento	207
Fijación color	354
Secado Vena	532

**Tabla 7.** Temperaturas promedio de la superficie del intercambiador de calor y del ambiente interior del horno para cada etapa del curado

Temperaturas (°C)	Amarillamiento	Fijación color	Secado vena
$T_w$	85	156	199
$T_\infty$	37	54	70

**Tabla 8.** Energía entregada por el intercambiador al ambiente interno del horno en las diferentes etapas del curado

Fase	Q (W)
Amarillamiento	4325
Fijación color	13200
Secado vena	17236

**Tabla 9.** Humedad relativa promedio en cada etapa de curado

Fase	HR (%)
Amarillamiento	78
Fijación color	55
Secado Vena	39

**Tabla 10.** Energía necesaria para el calentamiento del aire en el cambio de fase de curado

Fase	$Q_f$ (kJ*h <sup>-1</sup> )
Amarillamiento	10025
Fijación color	13542
Secado Vena	14014

En la **Tabla 10** se presenta la cantidad de energía necesaria para cambiar de una fase de curado a otra.

El cálculo de la energía necesaria para mantener las condiciones de temperatura y humedad relativa en un valor medio, teniendo en cuenta la variación entre máximos y mínimos en cada fase de curado, se realizó utilizando la **Ecuación 6** con los valores máximos y mínimos de las temperaturas del ambiente y las humedades relativas presentadas en la **Tabla 11**.

En la **Tabla 12** se muestran los valores calculados de la energía necesaria para mantener la temperatura promedio del ambiente interno para cada fase del curado.

### Eficiencia en el uso de la energía en el curado de tabaco

Para el análisis de la eficiencia en el uso del combustible se tuvieron en cuenta tres condiciones que se relacionan a continuación:

#### Eficiencia del intercambiador de calor ( $\eta_1$ ):

Energía entregada por el intercambiador por convección natural respecto a la energía total generada en la hornilla (**Tabla 13**).

#### Cuantificación de la energía utilizada para el calentamiento del aire

Porcentaje de energía empleada en el calentamiento del aire de curado para obtener las condiciones de temperatura para el inicio de cada una de las fases, respecto a la energía total producida en la hornilla ( $\epsilon_1$ ), y porcentaje de energía empleada para mantener la temperatura media del aire de curado durante cada una de las fases de curado, respecto a la energía total producida en la hornilla ( $\epsilon_2$ ), **Tabla 14**.

#### Cuantificación de la energía transmitida por el intercambiador de calor por convección natural

Porcentaje de la energía empleada en el calentamiento del aire de curado para obtener las condiciones de temperatura para el inicio de cada una de las fases, respecto a la energía entregada por el intercambiador al ambiente ( $\epsilon_3$ ) y porcentaje de energía empleada para

**Tabla 11.** Valores máximos y mínimos de las temperaturas del ambiente y las humedades relativas para cada etapa de curado

Fase	T (°C)		HR (%)	
	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima
Amarillamiento	33	40	63	89
Fijación color	43	61	44	77
Secado Vena	57	85	25	55

**Tabla 12.** Energía necesaria para mantener las temperaturas promedio del ambiente interno del horno en las fases de curado de tabaco

Fase	$Q_m$ (kJ*h <sup>-1</sup> )
Amarillamiento	1965
Fijación color	10247
Secado Vena	11308

**Tabla 13.** Eficiencia del intercambiador de calor para cada etapa de curado

Fase	$\eta_1$ (%)
Amarillamiento	7,6
Fijación color	13,5
Secado Vena	11,7

**Tabla 14.** Porcentaje del uso de la energía generada en la hornilla para el calentamiento del aire en cada etapa de curado

Fase	$\epsilon_1$ (%)	$\epsilon_2$ (%)
Amarillamiento	4,9	1,0
Fijación color	3,8	2,9
Secado Vena	2,6	2,1

**Tabla 15.** Porcentaje del uso de la energía transmitida por el intercambiador de calor por convección natural para cada etapa de curado

Fase	$\epsilon_3$ (%)	$\epsilon_4$ (%)
Amarillamiento	64,4	12,6
Fijación color	28,5	21,6
Secado Vena	22,6	18,2

mantener la temperatura media del aire de curado durante cada una de las fases de curado, respecto a la energía entregada por el intercambiador al ambiente ( $\epsilon_4$ ), **Tabla 15**.

Como se puede observar en las **Tablas 13, 14 y 15** la eficiencia en el aprovechamiento de la energía generada por el combustible es muy baja, debido especialmente a que la transferencia de calor se realiza por convección natural. Esto tiene dos efectos en el proceso. Uno de ellos la escasa utilización de la energía y el otro, la dificultad de transportar el aire caliente a través de la hoja de tabaco desde la parte inferior a la superior de la masa de tabaco, con los problemas de desuniformidad del curado antes mencionados.

#### 4. CONCLUSIONES

En los hornos tradicionales el sistema de transferencia de calor empleado es la convección natural con el uso de tuberías internas que se calientan con los gases de combustión provenientes de la hornilla. Este método es muy ineficiente, difícil de controlar y además genera riesgos de incendio del horno por la posibilidad de que la hoja de tabaco caiga sobre los tubos los cuales llegan en ocasiones a la condición de “rojo vivo”.

La variabilidad que tiene la temperatura a lo largo de la superficie del intercambiador de calor durante las diferentes etapas del curado, deja en evidencia la dificultad que tiene este sistema para generar condiciones estables de temperatura en el recinto.

Las condiciones ambientales en el interior del horno se ven directamente afectadas por el manejo de las compuertas de ventilación natural del horno de curado, lo que obedece más a un criterio personal que a un procedimiento estandarizado, y a la alimentación discontinua de combustible que provoca picos de temperaturas y de humedad relativa, que reflejan la influencia de esta forma de suministro del combustible en las variables de curado.

En los hornos evaluados la temperatura promedio del ambiente interior que se maneja para cada etapa, es cercana a los patrones recomendados por las empresas productoras de tabaco. Sin embargo existen crestas y valles que se alejan de manera importante del valor patrón.

En general, los tiempos empleados en las diferentes etapas del curado no corresponden a los sugeridos por las empresas comercializadoras, generando condiciones desfavorables en el proceso y excesivo consumo de combustible.

La eficiencia en el aprovechamiento de la energía generada por el combustible es muy baja, debido especialmente a que la transferencia de calor se realiza por convección natural. Esto tiene dos efectos en el proceso, uno de ellos la escasa utilización de la energía y el otro, la dificultad de transportar el aire caliente a través de la hoja de tabaco desde la parte inferior a la superior lo que provoca problemas de desuniformidad en el curado.

## REFERENCIAS

- Altobelli, F.; Condorí, M.; Díaz Russo, G.; Durán, G. (2010). Estudio del desempeño energético de una estufa de secado de tabaco. Salta, Argentina. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 14.
- Caicedo L. M.; Gómez, J.; Gómez, S. (2005). Diagnóstico integral de la cadena productiva para el subsector tabacalero en el departamento del Huila. Neiva. Gobernación del Huila, Secretaría de Agricultura, diciembre de 2005.
- Cerquera P., N.E.; Ruiz O., Y. L. (2007). Adecuación y evaluación del horno tradicional de curado de tabaco utilizando un intercambiador de calor que emplea como combustible carbón mineral o cisco de café. Universidad Surcolombiana, Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, Gobernación del Huila, Neiva, 136 p.
- Castillo N., A. *Almacenamiento de granos, aspectos técnicos y económicos*, 2ª edición, Bogotá: Ediagro, 1984, 148 p.
- Coltabaco, S. A., Curado., [En línea]. Disponible en: <http://www.coltabaco.com.co/curacion.htm> [consultado el 25 de abril de 2007].
- Melo, E.d.C. (1995). Secadero Experimental para el Curado de Tabaco Virginia en el Valle de Tietar: Determinación de Parámetros para ahorro energético del proceso, Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 110 p.
- Holman, J.P. *Transferencia de calor*. México: Compañía editorial S.A, 1996, 310 p.
- Ingeominas. *El carbón colombiano, fuente de energía para el mundo*. Bogotá, Colombia, Ministerio de minas y energía, 2005, 53 p.
- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, Observatorio Agrociencias Colombia (2005). *La cadena del tabaco en Colombia: una mirada global de su estructura y dinámica 1991-2005*. Documento de Trabajo No. 55. Bogotá, marzo de 2005. 44 p.
- Roa, G., Oliveros, C.E.; Álvarez, J.; Ramírez, C.A.; Sanz, J.R.; Álvarez, J.R.; Dávila, M.T.; Zambrano, D.A.; Puerta, G.I.; Rodríguez, N. *Beneficio ecológico del café*. Colombia, CENICAFE, 1999, 165 p.
- Servicio Nacional de Aprendizaje SENA Regional Santander (2005). Proceso productivo del tabaco rubio y/o negro para la fabricación de cigarrillos. Santander: SENA, [CD ROM] Módulo 5: Manejo final del tabaco curado.
- Zamora G., L.; Sarria L., B.; Cisnero R., Y. (2005). Uso de biomasa como fuente de energía para el secado agro-industrial del café: estudio de caso. *Revista Ciencias técnicas agropecuarias*, 14(1), pp. 55-60.

**PARA CITAR ESTE ARTÍCULO /  
TO REFERENCE THIS ARTICLE /  
PARA CITAR ESTE ARTIGO /**

Cerquera-Peña, N.E.; Pastrana-Bonilla, E. (2014). Evaluación de la eficiencia energética en los hornos tradicionales de curado de tabaco. *Revista EIA*, 11(22) julio-diciembre, pp. 155-165. [Online]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.14508/reia.2014.11.22.155-165>

