

## **EVALUACIÓN DEL HORNO DE CURADO DE TABACO POR CONVECCIÓN FORZADA USCO – MADR**

### **EVALUATION OF THE OVEN FOR CURING OF TOBACCO BY FORCED CONVECTION USCO – MADR.**

Néstor Enrique Cerquera Peña<sup>1</sup>, Yaneth Liliana Ruiz Osorio<sup>2</sup>

#### **Resumen**

Teniendo como base la infraestructura existente de un horno tradicional de curado de tabaco, se rediseño e implementó en él un sistema de intercambiador de calor por convección forzada, el cual funciona con carbón o con cisco de café como combustible. Este horno denominado "horno de curado de tabaco por convección forzada USCO – MADR" fue evaluado durante el periodo de cosecha y se encontró que con este montaje se logra un manejo controlado de las variables ambientales de temperatura y humedad relativa al interior del horno durante las tres etapas del curado de la hoja de tabaco; el equipo utilizado tiene un excelente desempeño al emplear cisco de café como combustible, con los siguientes consumos aproximados durante el proceso de curado: en la fase "amarillamiento" de 8.92 kilogramos por hora, en la fase de "secado de paño y fijación de color" de 17.75 kilogramos por hora y en la fase de "secado de vena" de 19.29 kilogramos por hora; el análisis comparativo de los costos operativos del horno evaluado, con los ajustes propuestos al mismo, permiten presentarlo a la cadena de tabaco como una alternativa promisoría.

**Palabras clave:** Curado de tabaco, intercambiador de calor, cisco de café, poscosecha de tabaco, tabaco virginia.

#### **Abstract**

Based on the existing infrastructure of a traditional oven for curing of tobacco leaves, it was redesigned and, in it, it was implemented a system of heat exchanger by forced convection, which works with charcoal or coffee hull as fuel. This oven called "curing oven for tobacco leaves by forced convection USCO – MARD" was evaluated during the cropping season founding that with this assembly the control of the environmental variables: temperature and relative humidity inside the furnace, during the three stages of curing of tobacco leaves, is accomplished, and the equipment used has an excellent performance when using coffee hull as fuel, with the following approximate consumption during the curing process: during the stage "yellowing" of 8.92 kilograms per hour, during the phase "drying of cloth and color fixation" of 17.75 kilograms per hour and during the stage of "drying of vein" of 19.29 kilograms per hour, the comparative analysis of the operating costs of the evaluated oven with the proposed adjustments to it, allow its implementation into the chain of tobacco as a promising alternative.

**Key words:** Curing of tobacco, heat exchanger, coffee hull, post-harvest of tobacco, Virginia tobacco

---

<sup>1</sup> Ingeniero Agrícola, Magister en Ingeniería Agrícola UN, Especialista en Ciencia y Tecnología de Alimentos UN, Profesor Asociado, Facultad de Ingeniería, Universidad Surcolombiana, Neiva, cerquera@usco.edu.co

<sup>2</sup> Ingeniera Agrícola, Universidad Surcolombiana Neiva, yloro821@hotmail.com.

## Introducción

El curado de la hoja de tabaco es un proceso crítico para la obtención de tabaco de buena calidad, por esta razón se han estudiado y diseñado diferentes métodos de curado con el fin de obtener una mejor calidad en el tabaco en un menor tiempo y en lo posible a un bajo costo, sin pasar por alto que las fases previas y posteriores a éste proceso también tienen gran incidencia en la calidad final del tabaco.

Las mejoras en el proceso de curado aún continúan, sin embargo, en el campo se aplican técnicas que van desde las más artesanales, hasta las más desarrolladas donde se manejan recintos cerrados que usan diferentes combustibles como fuente de calor y un sistema de ventilación que puede ser natural o forzado.

Con el interés de mejorar el sistema de curado más utilizado en Colombia, se acondicionó un horno tradicional de curado de tabaco con un sistema de calentamiento por convección forzada al que se le denomina “Horno de curado de tabaco por convección forzada USCO – MADR”, con el fin de obtener un mejor uso del combustible, mayor control en el manejo de la temperatura y humedad relativa interna del horno en cada una de las fases de curado y en consecuencia contribuir al mejoramiento de la calidad final de la hoja.

En el presente documento se presentan los resultados más relevantes obtenidos en la etapa experimental, que permiten proponerlo como una opción promisorio para el sector tabacalero. Con ello se pretende dar continuidad a las investigaciones relacionadas con el proceso de curado realizadas en el país y proponer alternativas de este proceso a todos los sectores involucrados en la cadena productiva de tabaco, teniendo como finalidad hacer de la poscosecha una actividad que permita lograr mayor calidad de la hoja de tabaco y por lo tanto incrementar la productividad y la rentabilidad del sector tabacalero.

## METODOLOGÍA

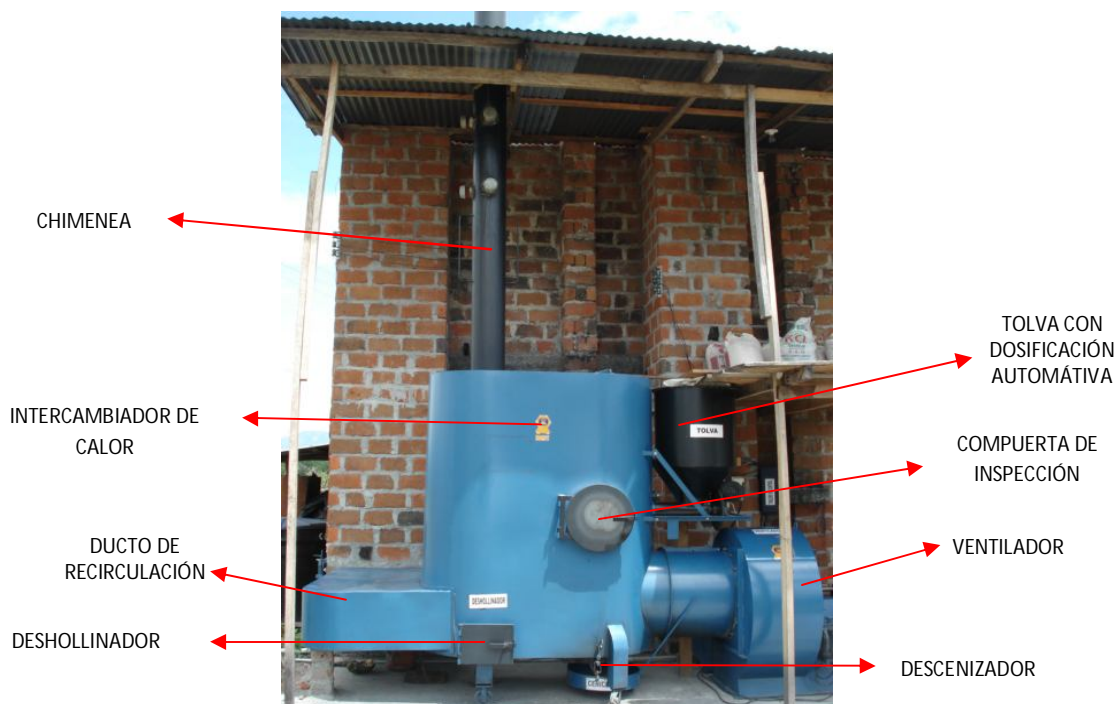
**Ubicación del Proyecto.** El proyecto se realizó en convenio con el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, el Fondo Nacional del Tabaco, el IICA, la Gobernación del Huila, la Asociación de cultivadores de tabaco de Garzón y la Universidad Surcolombiana, y se seleccionó para su ejecución la finca Villa Diamante ubicada en la vereda “La escalereta” a 5 Km del municipio de Garzón, por la vía que conduce al municipio del Agrado (Huila). En esta batería de hornos, se eligió el horno a reacondicionar y se tramitaron los permisos y compromisos necesarios con el propietario y la Asociación de cultivadores de Tabaco de Garzón, para el desarrollo de la etapa de adecuación y evaluación del horno.

Se realizaron las adecuaciones civiles requeridas para el montaje del nuevo sistema de calentamiento del aire, de acuerdo al rediseño planteado por Cerquera N, et al, 2006, en el que se contempla la eliminación de la hornilla de carbón, el retiro de los tubos de acero localizados al interior del horno tradicional, el recubrimiento del piso interior con una losa de concreto, la construcción en mampostería del ducto para el suministro del aire caliente al horno tanto por la parte inferior como superior, y del ducto de recirculación del aire de curado, la colocación del cielo falso, el cambio de las compuertas tradicionales por compuertas tipo persiana, y la construcción de una tarima para acceder a la tolva de alimentación del combustible

Realizadas las adecuaciones civiles se procedió al montaje del equipo intercambiador de calor vertical por convección forzada marca INGESEC, modelo IC 3000, que emplea el cisco de café como combustible, el cual está equipado con controles automatizados para la dosificación del cisco, figura 1.

Igualmente se realizó el montaje del sistema de humidificación que comprende: Un tanque de 500 litros, una electrobomba monofásica con motor de  $\frac{1}{2}$  HP y dos nebulizadores Foggers de 32 LPH a 40 PSI que incluyen manguera y válvula antigoteo, los cuales son removibles y se instalan una vez terminado el proceso de curado

**Figura 1. Vista general del equipo intercambiador de calor**



**Evaluación del intercambiador de calor.** Para evaluar el intercambiador de calor instalado en “el horno de curado de tabaco por convección forzada USCO – MADR” se hizo un seguimiento a las siguientes variables durante la cosecha de tabaco que inició en el mes de junio y finalizó los primeros días del mes de septiembre:

- Se realizó la evaluación del consumo de combustible utilizado pesando cada bulto suministrado a la tolva de recibo y registrando el tiempo transcurrido para la dosificación. Se registró el consumo de energía eléctrica tomando valores de voltaje y amperaje con una pinza voltiamperimétrica cada hora, durante todo el proceso de curado.
- Se evaluó la eficiencia en el uso de la energía producida mediante el seguimiento de la temperatura del aire a la salida del intercambiador de calor con una termocupla que tomó información cada cuatro minutos y en el ambiente de secado con cuatro termohigrómetros digitales que registraron temperatura y humedad relativa del ambiente de curado cada cinco minutos
- Se llevó un registro de los tiempos de cada etapa de curado y los respectivos consumos de combustible.

**Curva de secado de la hoja de tabaco.** Para obtener la curva de secado de la hoja de tabaco, se realizaron nueve (9) muestreos diarios en diferentes puntos del recinto de curado durante los ensayos 5 y 6, a estas muestras se les determinó el contenido de humedad utilizando el método gravimétrico oficial No. 966.02 de la Association of Official Agricultural Chemists AOAC INTERNATIONAL.

**Evaluación del equipo de humidificación.** Para establecer el comportamiento de la humedad dentro del recinto de curado una vez puesto en funcionamiento el sistema de humidificación se llevó a cabo el siguiente procedimiento:

- Se realizó una primera prueba con los humidificadores ubicados en la parte interior del ducto del ventilador y con el recinto de curado cargado de hoja de tabaco (1040 varas); una vez finalizado el proceso de curado, se tomaron muestras de tabaco en diferentes puntos del recinto para determinar la humedad de la hoja. Posteriormente se procedió a activar el sistema de humidificación durante 45 minutos y se tomaron otras muestras de hoja de tabaco para determinar la humedad ganada por la hoja. Además, se ubicaron al interior del horno cuatro equipos de medición (termohigrometros) que permitieron registrar la información de humedad relativa y temperatura.
- Se llevó a cabo una segunda prueba reubicando los humidificadores dentro del horno de curado a la salida del ducto del ventilador poniendo en funcionamiento el humidificador durante 60 minutos con el recinto vacío. Para establecer el comportamiento de la humedad durante este tiempo, se ubicaron cuatro (4) termohigrómetros en el plenum inferior y superior para el registro de la información.

**Evaluación de la presión estática.** Para determinar la presión estática dentro del horno de curado, se instalaron tres manómetros en la pared del plenum inferior y se obtuvo el registro de la misma durante el proceso de curado con 1400 varas.

## **RESULTADOS**

**Evaluación de la eficiencia del uso de la energía generada por el intercambiador de calor.** Para evaluar el uso de la energía generada por el equipo, se hizo un seguimiento a las temperaturas en el ducto del ventilador y en el ambiente de curado, CERQUERA, N et al, 2007. A continuación se presentan los resultados obtenidos con cisco de café.

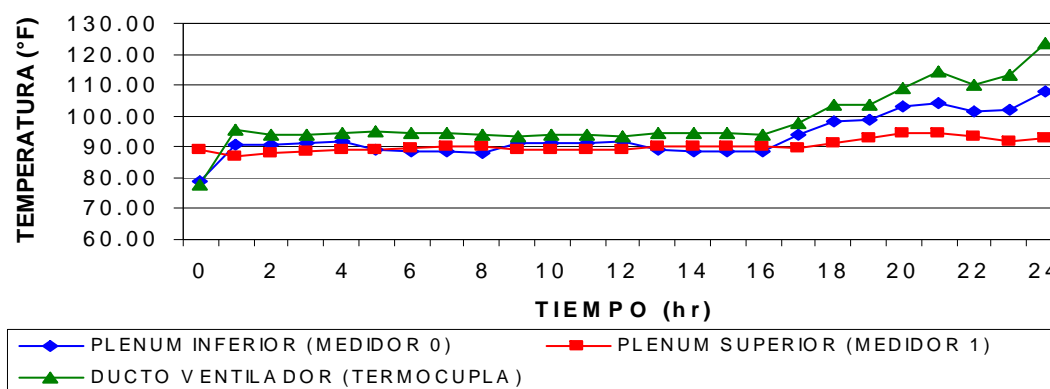
El sistema fue diseñado para realizar inversión de flujo con el fin de lograr un curado más homogéneo y un mejor aprovechamiento energético, por tal razón en el ensayo que se ilustra, se realizaron pruebas con inversión de flujo cada cuatro horas, salvo en algunas ocasiones donde se prolongó la inversión con el fin de lograr observar el comportamiento de la temperatura y humedad relativa dentro del recinto, es de anotar que en los ensayos restantes la inversión de flujo se realizó cada ocho horas, observándose un buen comportamiento en el proceso de curado del tabaco

**Comportamiento de la temperatura durante la fase de “amarillamiento”.** En la figura 2 se presentan las curvas que reflejan el comportamiento de la temperatura en los diferentes puntos de medición, ubicados en el plenum inferior y en superior, durante la etapa de amarillamiento en el ensayo realizado con cisco de café. En esta figura se observa que el comportamiento de la temperatura, tanto en el plenum inferior como superior, permanece aproximadamente constante durante la mayor parte de la fase de amarillamiento y que existe muy poca diferencia entre ellas, independientemente de si el

aire ingresa por el plenum inferior o por el superior, presentándose una temperatura media de 92 °F (33.3°C) dentro del recinto de curado.

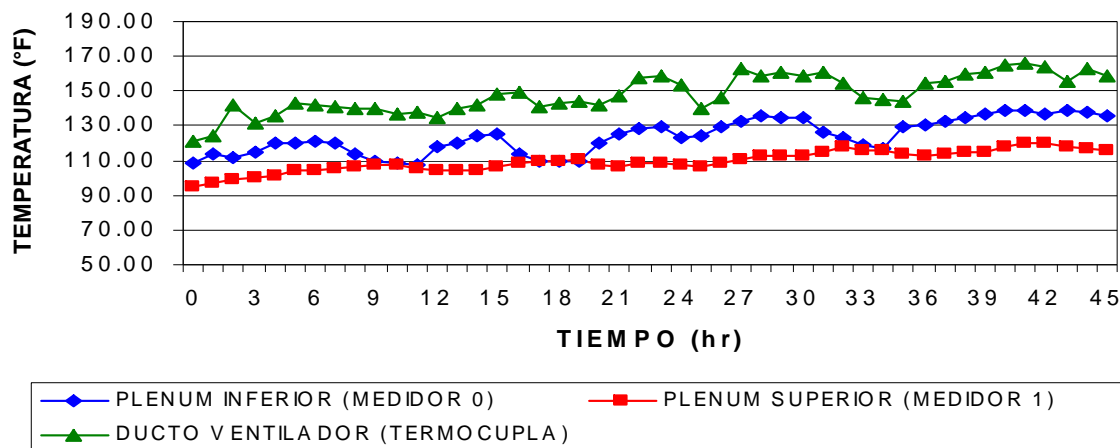
Además, se observa que hacia el final del proceso de amarillamiento, cuando el aire se suministró por el plenum inferior, la diferencia de temperatura entre el aire en el ducto del ventilador y el plenum se incrementó, obteniéndose una diferencia máxima de 15.48 °F (8.6 °C). Esta caída en la temperatura es originada por el gran volumen del plenum y del horno, lo que genera pérdidas de energía.

**Figura 2. Comportamiento de la temperatura en el ambiente de curado durante la etapa de amarillamiento.**



**Comportamiento de la temperatura durante la fase de “secado de paño y fijación de color”.** En la figura 3, se presentan las curvas que reflejan el comportamiento de la temperatura en los diferentes puntos de medición durante la etapa de secado de paño y fijación de color. Esta figura permite ver que la diferencia entre la temperatura del ducto del ventilador y el ambiente al interior del recinto es un poco más alta que la obtenida en la etapa de amarillamiento (cisco de café) con una diferencia máxima de 29.88 °F (16.6°C). Además, las curvas que representan el comportamiento de la temperatura en el plenum inferior y superior dentro del recinto de curado reflejan, con mucha más claridad, los cambios generados por la inversión de flujo

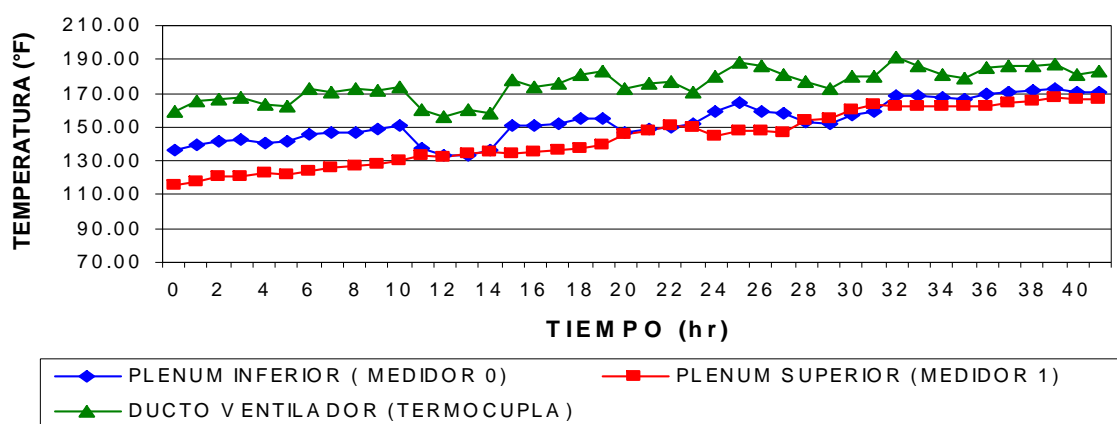
**Figura 3. Comportamiento de la temperatura en el ambiente de curado durante la fase de Secado de Paño y Fijación de Color. Combustible cisco de café.**



**Comportamiento de la temperatura durante la fase de secado de vena.** En la figura 4, las curvas que reflejan el comportamiento de la temperatura del ambiente dentro del recinto presentan un incremento gradual, con una disminución de la diferencia de las mismas a medida que avanzó el proceso. En el inicio de esta etapa se presentaron diferencias de temperatura entre el plenum inferior y superior con un valor máximo de 20.16 °F (11°C). Además, entre el ducto del ventilador y el ambiente dentro del recinto de curado, se presentó un gradiente máximo de 26.64°F (14.8 °C).

Esta curva refleja un comportamiento de ascenso moderado de la temperatura dentro del recinto de curado. En general, con el ensayo realizado con cisco de café se logró llegar hasta los 170°F (76.9 °C).

**Figura 4. Comportamiento de la temperatura en el ambiente de curado durante la fase de Secado de Vena. Combustible cisco de café.**



En la tabla 1, se presentan las temperaturas promedio obtenidas durante cada una de las etapas en los diferentes ensayos realizados y las temperaturas patrón sugeridas para cada fase de curado por las empresas productoras de tabaco. En nesta tabla se puede apreciar que los valores de temperatura promedio, para cada una de las etapas de curado, estuvieron dentro del rango de las temperaturas sugeridas por las empresas productoras de tabaco.

Con esta información se puede observar que con la utilización del intercambiador de calor por convección forzada, se elimina el problema de las fluctuaciones de temperatura tan drásticas que se presentan en el horno tradicional de curado por convección natural, reportadas en la evaluación realizada por Cerquera, N. 2006, lo que garantiza un mejor control sobre las variables de curado.

**Comportamiento de la temperatura de bulbo seco, bulbo húmedo y humedad relativa durante la fase de amarillamiento.** En las siguientes figuras, se presenta el comportamiento de la temperatura de bulbo seco, bulbo húmedo y humedad relativa obtenida durante la fase de amarillamiento.

En la figura 5, las temperaturas de bulbo seco y bulbo húmedo en el plenum inferior inician con el mismo valor debido a que el ambiente se encontraba bajo condiciones de saturación, presentándose durante las primeras 16 horas del proceso muy poca diferencia entre estas temperaturas, tanto en el plenum inferior como superior. A partir de las 17

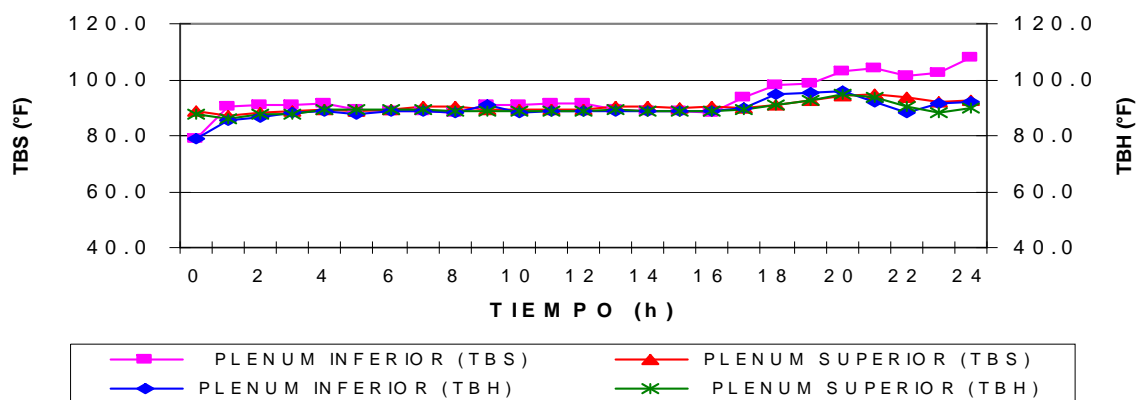
horas, la curva que representa la temperatura de bulbo seco en el plenum inferior empieza a ascender respecto a la temperatura de bulbo seco del plenum superior con una diferencia máxima de 15.3 °F (8.5°C) mientras la temperatura de bulbo húmedo empieza a descender paulatinamente.

**Tabla 1. Temperaturas promedio en los puntos de medición para cada fase de curado por ensayo.**

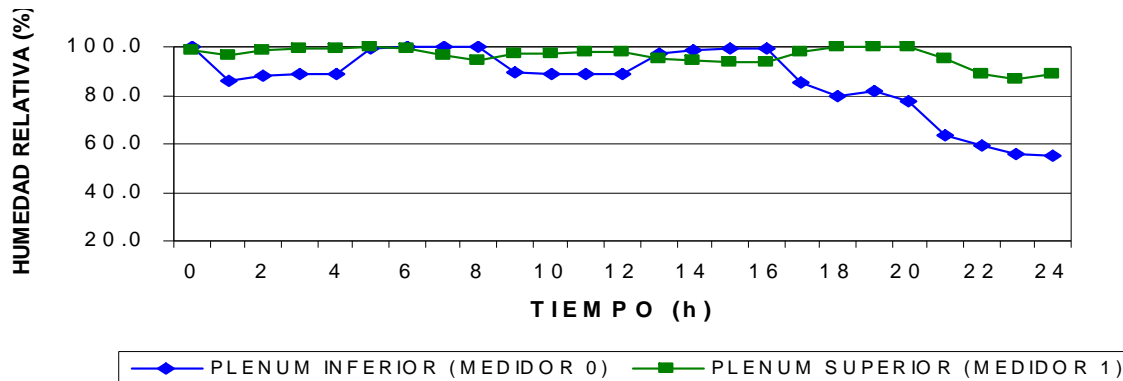
ENSAYO	MEDIDOR	TEMPERATURAS PROMEDIO EN LOS ENSAYOS REALIZADOS					
		AMARILLAMIENTO		SECADO DE PAÑO Y FIJACION DE COLOR		SECADO DE VENA	
		°F	°C	°F	°C	°F	°C
1	0	99.30	37.40	111.60	44.20	139.40	59.70
	1	96.10	35.60	106.90	41.60	130.80	54.90
	2	96.40	35.80	105.60	40.90	128.70	53.70
	3	94.70	34.90	107.60	42.00	130.50	54.70
	4	95.50	35.30	108.70	42.60	131.50	55.30
2	0	93.60	34.20	123.60	50.90	153.30	67.40
	1	90.30	32.40	109.50	43.00	143.60	62.00
3	1	98.40	36.90	120.40	49.10	133.90	56.60
	2	100.00	37.80	123.10	50.60	136.90	58.30
	3	97.80	36.60	122.60	50.30	138.50	59.20
	4	98.10	36.70	122.00	50.00	139.60	59.80
4	1	96.70	35.90	114.30	45.70	147.20	64.00
	2	96.30	35.70	112.50	44.70	148.20	64.60
	3	96.50	35.90	117.00	47.20	148.60	64.80
	4	94.60	34.80	114.00	45.50	150.30	65.70
5	1	94.10	34.50	113.00	45.00	145.40	63.00
	2	92.30	33.50	111.90	44.40	143.40	61.90
	3	94.40	34.70	115.00	46.10	150.10	65.60
	4	92.80	33.80	113.70	45.40	147.20	64.00
6	1	98.50	36.90	127.90	53.30	157.10	69.50
	2	99.00	37.20	128.30	53.50	155.40	68.60
	3	98.70	37.10	126.40	52.50	154.70	68.20
	4	97.50	36.40	124.20	51.20	152.00	66.70
PATRONES		90 - 110	32.2 -43.3	120 - 140	48.8 - 60	160	71.10

**Nota:** Los medidores 0, 1 y 2 fueron ubicados en el plenum inferior para los ensayos 1, 3, 4, 5 y 6. Los medidores 3 y 4 se ubicaron en el plenum superior para los ensayos 1, 3, 4, 5 y 6. Para el ensayo 2, el medidor cero (0) fue ubicado en el plenum inferior y el medidor uno (1) en el plenum superior.

**Figura 5. Temperatura de bulbo seco (TBS) y temperatura de bulbo húmedo (TBH) del ambiente de curado durante la fase de amarillamiento.**



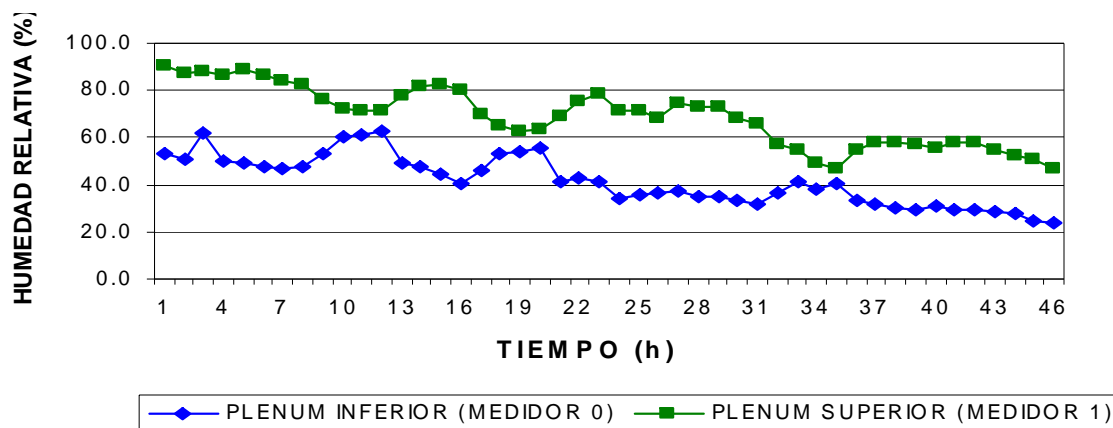
**Figura 6. Comportamiento de la humedad relativa en el ambiente de curado durante la fase de Amarillamiento. Combustible cisco de café.**



En la figura 6, correspondiente a la fase de amarillamiento, se observa cómo la humedad relativa tanto en el plenum inferior como superior, durante las primeras 16 horas, fluctúa entre el 100% y el 85%, dependiendo esto de si la alimentación del flujo de aire se hacía por el plenum inferior o por el plenum superior. A partir de las 17 horas del proceso, con alimentación del flujo de aire por el plenum inferior, la humedad relativa en este empieza a descender llegando hasta un 55%, mientras en el plenum superior el descenso es menor obteniéndose una humedad relativa del 88%, lo que se debe principalmente a que el aire al pasar a través de la masa de tabaco gana humedad.

**Comportamiento de la humedad relativa durante la fase de secado de paño y fijación de color.** Durante el secado de paño, figura 7, la humedad relativa en el plenum inferior siempre estuvo por debajo de la curva de humedad relativa del plenum superior, debido a que la mayor parte del tiempo el aire fue alimentado por el plenum inferior, presentándose una diferencia máxima de 38 puntos. Además es notorio el comportamiento descendente de cada una de las curvas lo que representa el proceso de deshidratación de la hoja la cual, a medida que avanza el proceso, entrega menos humedad al aire.

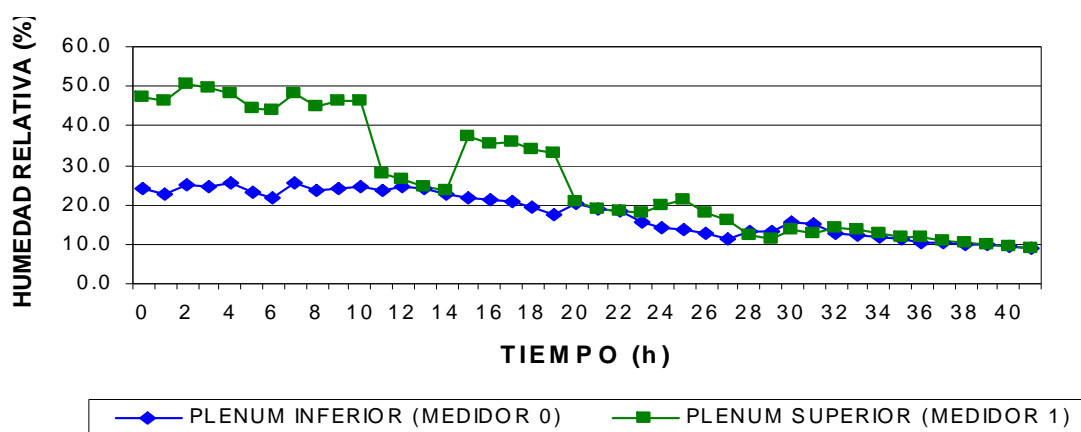
**Figura 7. Comportamiento de la humedad relativa en el ambiente de curado durante la fase de Secado de Paño y fijación de color.**





**Comportamiento de la humedad relativa durante la fase de secado de vena.** En la fase de secado de vena, figura 8, se observa durante las primeras 11 horas del proceso, una diferencia marcada entre la humedad relativa del aire que ingresa a la masa de tabaco y la humedad relativa que sale de esta. Después de la hora 11, la diferencia se va haciendo menos marcada hasta ser prácticamente nula. En esta última fase la hoja está con muy bajo contenido de humedad y el aire ya no ejerce un fuerte potencial de secado en ella, esto sucede a partir de la hora 30, de ahí en adelante la deshidratación prácticamente ha cesado.

**Figura 8. Comportamiento de la humedad relativa en el ambiente de curado durante la fase de Secado de Vena.**



**Humedad relativa promedio.** En la tabla 2 se presentan los valores de humedad relativa promedio, obtenidos durante cada una de las fases de curado, en cada uno de los ensayos.

Los valores promedio de la humedad relativa obtenidos durante el proceso de curado, para cada ensayo, indican que su comportamiento estuvo cercano a los patrones recomendados para la etapa de amarillamiento por las empresas productoras de tabaco. En algunos casos la humedad relativa estuvo por encima de estos patrones, sin embargo, se observó que el hecho de obtener valores por encima de lo indicado como es el caso de los medidores 1, 2 y 4 en los ensayos 2 y 4, permitieron un amarillamiento más homogéneo y en menos tiempo del empleado en los otros ensayos.

En la fase de secado de paño y fijación de color, en general, se presentaron valores inferiores a los patrones sugeridos, los cuales no tuvieron incidencia en la calidad de la hoja. Igualmente en la fase de secado de vena se presentaron valores inferiores a los sugeridos por la literatura, sin que se observara un efecto negativo sobre la calidad final de la hoja.

**Tabla 2. Humedad relativa promedio en los puntos de medición para cada fase de curado por ensayo**

ENSAYO	MEDIDOR	HUMEDAD RELATIVA PROMEDIO EN LOS ENSAYOS REALIZADOS		
		AMARILLAMIENTO	SECADO DE PAÑO	FIJACION DE COLOR
1	0	79.10	49.70	24.30
2	0	85.80	41.70	17.90
	1	96.20	69.20	26.30
3	1	73.70	34.90	19.50
	2	71.80	33.00	17.80
	3	73.90	32.10	16.90
	4	74.50	34.20	17.40
4	1	81.00	38.80	11.50
	2	93.90	45.70	12.20
	3	83.80	36.40	11.90
	4	90.60	42.90	10.70
5	1	64.00	33.80	12.00
	2	67.90	36.40	13.70
	3	60.50	31.70	11.10
	4	76.40	35.50	12.80
6	1	78.00	28.00	11.60
	2	70.00	27.20	11.30
	3	69.00	28.60	11.90
	4	76.20	31.40	12.10
PATRONES		75 - 85	75 - 40	40 - 20

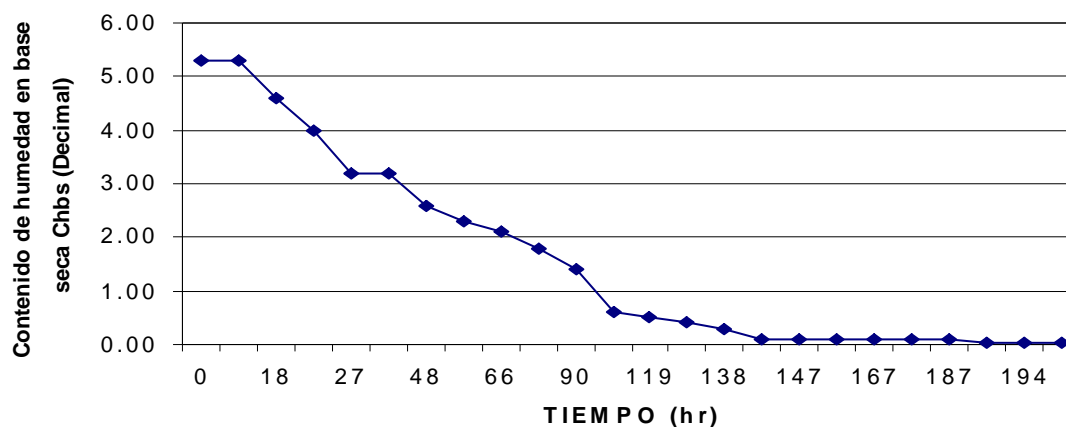
**Nota.** Los medidores 0, 1 y 2 fueron ubicados en el plenum inferior para los ensayos 1, 3, 4, 5 y 6.

Los medidores 3 y 4 se ubicaron en el plenum superior para los ensayos 1, 3, 4, 5 y 6.

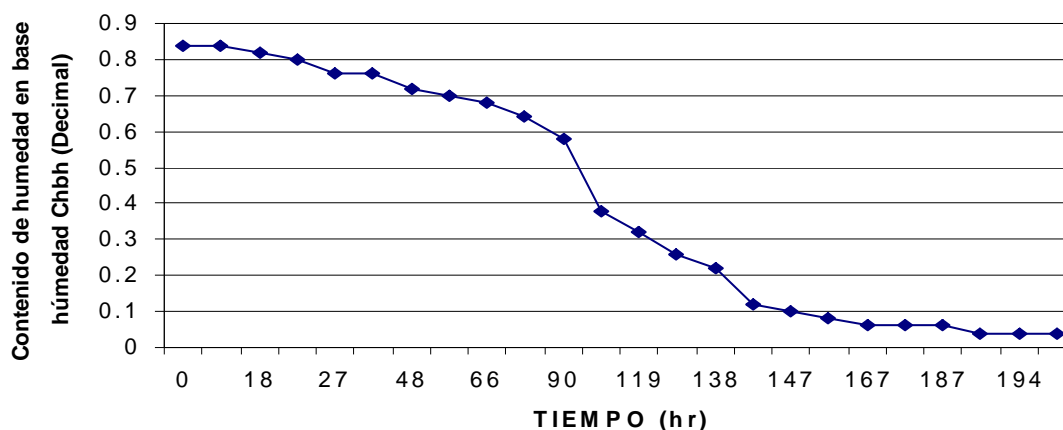
Para el ensayo 2, el medidor cero (0) fue ubicado en el plenum inferior y el medidor uno (1) en el plenum superior.

**Curva de secado de la hoja de tabaco.** En las siguientes figuras, se presenta el comportamiento de la variación del contenido de humedad de la hoja de tabaco a través del tiempo de curado.

**Figura 9. Contenido de humedad de la hoja (base seca) de la hoja de tabaco durante el proceso de curado en el ensayo 5.**



**Figura 10. Contenido de humedad de la hoja (base húmeda) de la hoja de tabaco durante el proceso de curado en el ensayo 5.**



En las figuras 9 y 10 se observa tres etapas durante el proceso de deshidratación de la hoja durante el proceso de curado. La primera, durante la etapa de amarillamiento e inicio del secado de paño, en donde la pérdida de humedad es muy lenta, una segunda etapa que corresponde a secado de paño y secado de vena donde la velocidad de secado se ve claramente incrementada, pasando de un contenido de humedad de aproximadamente 70% al 10% en base húmeda, y por último en la fase final del secado de vena donde la pérdida de humedad es casi imperceptible.

**Consumos promedio de combustible en cada una de las etapas de curado:** En la tabla 3 se presentan los consumos promedio de combustible para cada fase del curado de tabaco.

**Tabla 3. Consumo promedio de Combustible en cada una de las fases de curado ( $\text{kg.h}^{-1}$ )**

Combustible	Fases de Curado	Consumo ( $\text{Kg .h}^{-1}$ )
Cisco	Amarillamiento	8.92
	Secado de paño y Fijación de Color	17.76
	Secado de vena	19.29

Para determinar la energía entregada al aire por el intercambiador de calor, para cada una de las etapas de curado, se tuvo en cuenta el poder calorífico del cisco de café y la cantidad de combustible promedio que se empleó durante cada fase (tabla 4).

**Tabla 4. Energía generada en el intercambiador de calor por la combustión del cisco de café en cada fase de curado considerando un poder calorífico de  $17936 \text{ KJ.Kg}^{-1}$  \***

Fase	$Q_t (\text{KJ.h}^{-1})$	$Q_t (\text{Btu.h}^{-1})$
Amarillamiento	159989.12	151648.46
Secado de Paño y Fijación Color	318543.36	301936.83
Secado Vena	345985.44	327948.28

\* ROA M, Gonzalo., et al. Beneficio ecológico del café. CENICAFE. Colombia, 1999. 166 p.

**Cálculo de la energía transferida al aire por el intercambiador de calor en cada una de las etapas de curado.** Para calcular la energía que entrega el intercambiador al aire se utilizó la siguiente ecuación (HOLMAN, J.P. Transferencia de calor, 1998):

$$E = m \cdot C_p \cdot (T_1 - T_{\infty}) \quad (1)$$

Donde:

E: Energía entregada por el intercambiador de calor al ambiente de curado en Btu.hr<sup>-1</sup>.

m: Flujo másico, donde  $m = Q \cdot V_e^{-1}$ , en Kg.min<sup>-1</sup>

C<sub>p</sub>: Calor específico del aire en KJ. Kg<sup>-1</sup> °C

T<sub>∞</sub>: Temperatura del aire que ingresa al intercambiador en °C

T<sub>1</sub>: Temperatura del aire a la salida del ventilador en °C

Las temperaturas promedio del aire de secado y del ambiente se obtuvieron de las lecturas realizadas en los diferentes puntos de medición dentro del ducto del ventilador y el ambiente al interior del horno, durante las tres etapas de curado. Estos valores se presentan en la tabla 5:

**Tabla 5. Temperaturas promedio del aire de secado y del ambiente para cada fase de curado. Ensayo realizado con cisco de café.**

Temperaturas (°C)	Amarillamiento	Secado de Paño y Fijación color	Secado Vena
T <sub>∞</sub>	34.92	46.12	62.35
T <sub>1</sub>	40.0	56.0	74.0

La energía transferida en el intercambiador de calor para la etapa de amarillamiento en el ensayo realizado con cisco de café fue calculada aplicando el siguiente procedimiento:

Teniendo la siguiente información

T<sub>∞</sub> = 34.92 °C

T<sub>1</sub> = 40 °C

Q = 361.46 m<sup>3</sup>.min<sup>-1</sup> (Obtenido de la hoja técnica del ventilador Ref 245, suministrada por el fabricante)

V<sub>e</sub> = 0.9966 m<sup>3</sup>. Kg<sup>-1</sup>

C<sub>p</sub> = 1.0062 KJ. Kg<sup>-1</sup>°C<sup>-1</sup>

m = Q / V<sub>e</sub> = 362.69 Kg. min<sup>-1</sup>

Reemplazando de la Ecuación 1: E = 111234.28 KJ. hr<sup>-1</sup> = 105435.33 Btu. hr<sup>-1</sup>

Para el cálculo de la energía transferida en el intercambiador de calor en las etapas de fijación de calor y secado de vena se siguió el mismo procedimiento anterior obteniendo los resultados presentados en la tabla 6.

**Tabla 6. Energía transferida en el intercambiador de calor para las diferentes etapas de curado. Combustible cisco de café.**

Fase	E (KJ.hr <sup>-1</sup> )	E (Btu.h <sup>-1</sup> )
Amarillamiento	111234.28	105435.33
Secado de Paño y Fijación Color	209511.40	198589.00
Secado Vena	237178.08	224813.35

**Eficiencia del uso de la energía en el curado de tabaco:** Para el análisis de la eficiencia en el uso del combustible se tuvo en cuenta la energía generada en el intercambiador de calor por la combustión del cisco de café (tabla 4), y la energía transferida al aire al atravesar por el intercambiador de calor en cada una de las fases de curado.

**Eficiencia del intercambiador de calor ( $\eta$ ):** Energía transmitida por convección forzada respecto a la energía total generada en el intercambiador de calor.

**Tabla 7. Eficiencia del intercambiador de calor para cada etapa de curado. Ensayo realizado con cisco de café.**

Fase	$\eta$ (%)
Amarillamiento	70
Fijación color	66
Secado Vena	69

Como se puede observar en las tablas anteriores la eficiencia en el aprovechamiento de la energía generada por el combustible en el intercambiador de calor es alta, por lo que se puede concluir que la transferencia de calor por convección forzada, permite el buen aprovechamiento de la energía durante cada una de las fases de curado.

**Consumo de combustible y tiempos de curado:** A continuación, en la tabla 8 se presentan los consumos de combustible en cada una de las fases de curado, para cada uno de los ensayos realizados. Con el uso de cisco se observa que en cada etapa se ve incrementado el consumo medio horario de combustible, lo cual obedece a los requerimientos de mayor temperatura en cada una de las fases del curado.

En cuanto a la duración promedio, la fase de amarillamiento fue la mas prolongada, especialmente en los ensayos 5 y 6 los cuales se llevaron a cabo con hojas alteras; además en el ensayo 6 su resultado se debió principalmente al estado en el que llegó la hoja del lote, pues aún no se encontraba suficientemente madura ya que su color se tornaba verde oscuro, y además, a el horno fue cargado con 1400 varas.

En la etapa de amarillamiento el tiempo de alimentación de la tolva fue de aproximadamente cinco horas y en las etapas de secado de paño y secado de vena, se realizó cada dos horas debido al mayor consumo de combustible.

En equipos similares, instalados para el secado de café, se les ha acondicionado una tolva de mayor tamaño que permite que la alimentación de cisco a la misma se realice en períodos de siete a ocho horas.

**Tabla 8. Consumos de combustible durante las fases de curado de hoja de tabaco.**

COMBUSTIBLE	ETAPA	ENSAYO	CONSUMO TOTAL (kg)	DURACIÓN (hr)	CONSUMO (kg. h <sup>-1</sup> )
CISCO	AMARILLAMIENTO	1	459.00	54.45	8.43
		2	163.00	24.83	6.56
		5	1114.00	93.00	12.00
		6	1047.00	120.00	8.70
	PROMEDIO		695.75	73.07	8.92

**Continuación tabla 8. Consumos de combustible durante las fases de curado de hoja de tabaco.**

COMBUSTIBLE	ETAPA	ENSAYO	CONSUMO TOTAL (kg)	DURACIÓN (hr)	CONSUMO (kg. h <sup>-1</sup> )
	SECADO DE PAÑO Y FIJACION DE COLOR	1	528.00	27.55	17.86
		2	1010.00	44.17	22.87
		5	1293.00	78.00	16.58
		6	1261.00	89.00	13.70
	PROMEDIO		1023.00	59.68	17.75
	SECADO DE VENA	1	353.00	19.50	21.59
		2	876.00	39.00	22.46
		5	314.50	17.00	18.50
		6	219.00	15.00	14.60
	PROMEDIO		440.63	22.63	19.29
CURADO TOTAL			2159.38	155.38	13.89

**Consumo de energía eléctrica:** Con los valores de consumo de energía registrados en campo, relacionados en la tabla 9, se obtuvo un consumo promedio de energía eléctrica de 6 kw.hr<sup>-1</sup> en el equipo intercambiador de calor.

**Tabla 9. Consumo de energía eléctrica promedio**

Ensayo	Consumo promedio de energía eléctrica (Kw.hr <sup>-1</sup> )
2	5.95
3	6.56
4	6.21
5	5.16
6	6.23

**Evaluación del humidificador por nebulización:** Para la evaluación del sistema de humidificación se realizaron dos pruebas, la primera con hoja de tabaco en el recinto de curado y con los nebulizadores en el interior del ducto del ventilador (prueba 1) y la segunda con el recinto vacío y con los humidificadores a la salida del ducto (prueba 2).

En la tabla 10 se presentan los valores de la humedad relativa del ambiente del recinto y el contenido de humedad de la hoja de tabaco antes y después del proceso de humidificación el cual tuvo una duración de 45 minutos para la prueba 1. En esta tabla, se puede apreciar que la hoja de tabaco después de terminar el proceso rehumidificación gana 6 puntos de humedad, de igual forma se puede observar el efecto del humidificador en el cambio de la humedad del recinto, sobre todo en el plenum inferior por donde se alimentó el aire húmedo.

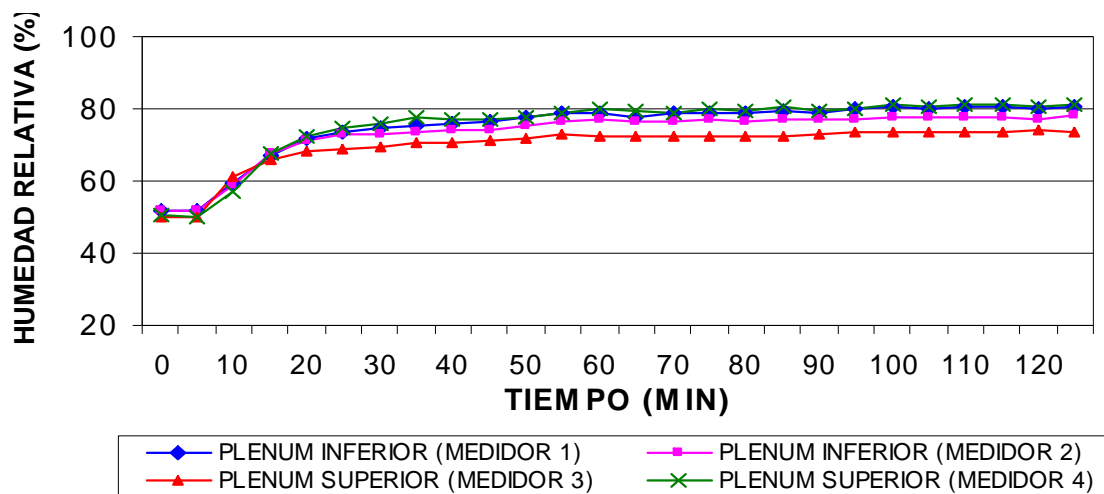
En la figura 11, se representan las condiciones ambientales, una vez puesto en funcionamiento el sistema de humidificación con el horno de curado vacío, en la prueba 2. En ella se observa cómo la humedad asciende rápidamente dentro del recinto con una ganancia de aproximadamente 29 puntos de humedad relativa en un tiempo de 30 minutos, de ahí en adelante la humedad relativa permaneció constante dentro del recinto, durante el tiempo que permaneció activado el sistema de humidificación. Bajo estas

condiciones, se puede elevar el contenido de humedad de la hoja de tabaco para permitir su manipulación de descargue y desencuje, reduciendo las perdidas y permitiendo, si así se requiere, el envío de la hoja directamente a la sala de clasificación.

**Tabla 10. Variación del contenido de humedad de la hoja de tabaco y de la humedad relativa del horno con humidificación. Prueba 1.**

	VARIABLES	INICIAL	FINAL
HOJA DE TABACO	Chbh (Decimal)	0.04	0.10
	Chbs (Decimal)	0.04	0.11
PLENUM INFERIOR	Humedad Relaiva (%)	29.65	50.95
PLENUM SUPERIOR	Humedad Relaiva (%)	27.7	28.25

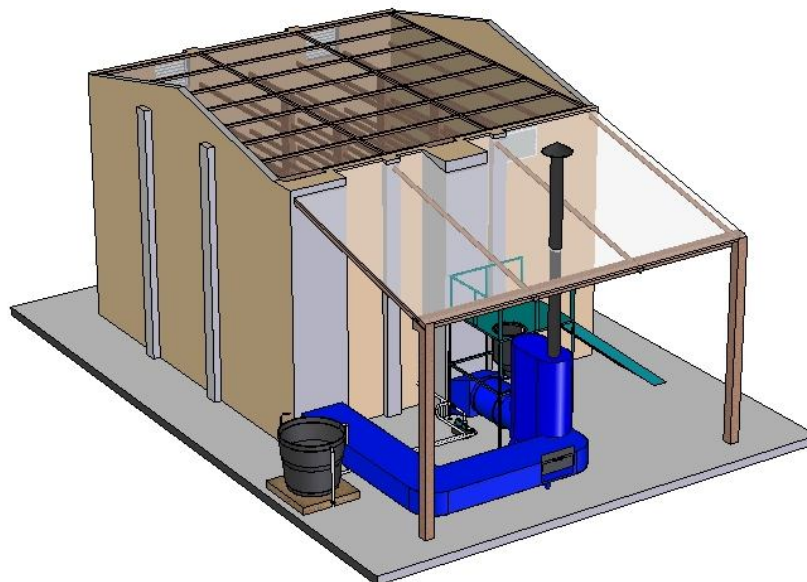
**Figura 11. Comportamiento de la humedad relativa en el horno de curado con el sistema de humidificación.**



**Evaluación de la presión estática:** Para establecer si el ventilador puesto en funcionamiento era el apropiado para el montaje realizado, fue necesario determinar la presión estática dentro del recinto de curado; dicha evaluación dio como resultado una presión estática de un cuarto de pulgada ( $\frac{1}{4}$  pulgada) de agua, la cual está por debajo de la capacidad del ventilador instalado que es de 2.5 pulgadas de agua, lo que permite recomendar el cambio del ventilador centrífugo a un ventilador axial con las siguientes especificaciones: Ventilador Axial referencia AX – 30 de aleta tipo “air fluid”, de 30 pulgadas de diámetro y con un motor de 5 HP, con una presión estática de 1.5 pulgadas de agua, y caudal equivalente al suministrado por el ventilador centrífugo inicialmente instalado.

El cambio de ventilador permite una reducción del costo inicial del equipo y en el consumo de energía eléctrica por parte del ventilador que según lo reportado por PROTABACO es de  $3.5 \text{ Kw.h}^{-1}$ . A este nuevo montaje se le denomina en adelante: “Horno de curado de tabaco por convección forzada USCO – MADR - 2” (figura 14). Los detalles del montaje con los cambios sugeridos se pueden consultar en el documento “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.” Cerquera N, et al, 2007.

**Figura 14. Perspectiva del “Horno de curado de tabaco por convección forzada USCO – MADR – 2”.**



**Análisis comparativo de costos:** El análisis comparativo de costos entre el horno tradicional y el “Horno de curado de tabaco por convección forzada USCO – MADR”, se realizó por kilogramo de tabaco seco.

**Presupuestos para el cálculo de los costos en el horno tradicional de curado.** Para efectuar el análisis de los costos se analizaron las variables que son directamente afectadas por la implementación de la tecnología evaluada. Para ello se tuvo en cuenta las siguientes consideraciones del horno tradicional de curado:

- Un horno tradicional de curado generalmente trabaja con 1200 varas, que equivalen a 960 Kilogramos de tabaco seco, para efecto de los cálculos se asume de aproximadamente una tonelada (1 Ton). Se considera que este horno está diseñado para suplir las necesidades de curado para 2.5 hectáreas, lo que a su vez equivale a 8 horneadas por programa.
- El tiempo de hornada promedio en el horno tradicional es de 8 días
- El valor de un kilogramo de carbón es de \$160.
- El consumo promedio de carbón mineral en el horno tradicional es de 2.5 Kilogramo carbón por Kilogramos de tabaco seco. Esto representa un costo de \$400 de combustible por Kilogramos de tabaco seco.
- El hornero recibe, en promedio \$150 por Kilogramo de tabaco seco
- Los costos de mantenimiento del horno tradicional son de aproximadamente \$44875 por hornada, lo que equivale a \$45 por kilogramo de tabaco seco.

**Presupuestos para el cálculo de los costos en el “Horno de curado de tabaco por convección forzada USCO – MADR”** Para el análisis de este horno se tuvo en cuenta las siguientes consideraciones:

- Este horno puede tener una capacidad superior a las 1400 varas, sin embargo, para efectos del presente análisis, se considera que su capacidad es de 1200 varas, equivalente a una tonelada de tabaco seco.



- El tiempo promedio utilizado por horneada es de 6 días
- El cisco tiene un valor de \$25 por kilogramo a granel y de \$37 por kilogramo incluyendo costo de las bolsas y el empackado.
- El consumo promedio de cisco de café como combustible en el “Horno de curado por convección forzada para hoja de tabaco USCO – MADR” es de 2.2 kilogramos por kilogramo de tabaco seco, esto representa un costo de \$55 por kilogramo de tabaco seco, si este se compra a granel, o de \$81.5 por kilogramo de tabaco seco si se incluyen los costos de bolsas y empackado.
- El consumo de energía eléctrica en el “Horno de curado de tabaco por convección forzada USCO – MADR” con un ventilador centrífugo y motor de 7.5 HP, fue de  $6 \text{ KW.h}^{-1}$  con un precio de  $\$315 \text{ KW.h}^{-1}$  lo que representa un consumo de \$272 de energía eléctrica por kilogramo de tabaco seco.
- Teniendo en cuenta la modificación propuesta en el equipo para el “Horno de curado de tabaco por convección forzada USCO – MADR - 2”, que consiste en instalar un ventilador axial con motor de 5 HP con el que se reduce el consumo de energía a  $3.5 \text{ Kw.h}^{-1}$  (PROTABACO S.A. MADR), se obtiene un costo de \$158.8 de energía eléctrica por kilogramo de tabaco seco.
- El costo de operación se estima teniendo en cuenta una batería de seis hornos con sus respectivos equipos, operados en tres turnos, lo que equivale al pago de tres (3) jornadas por día, a razón de \$25000 por jornada, para un total de \$75000 día. De acuerdo a lo anterior el costo de mano de obra es de \$75 por kilogramo de tabaco seco
- Se estima el costo de mantenimiento del equipo del “Horno de curado de tabaco por convección forzada USCO – MADR”, en \$120.000 mes, lo que equivale a \$30.000 por horneada y a \$30 por kilogramo de tabaco seco.

Teniendo en cuenta las anteriores consideraciones, en la tabla 11 se presenta el análisis económico comparativo, en el que se ilustra el efecto económico que tiene en los costos la implementación del “Horno de curado por convección forzada para hoja de tabaco USCO – MADR”.

Con los valores obtenidos en la tabla 11 se tiene que los costos de horneo por programa en un horno tradicional ascienden a \$4.760.000 y en el “Horno de curado de tabaco por convección forzada USCO – MADR - 2” a \$2.756.000, lo equivale a una reducción en los costos de \$2.004.000 para dos y media hectáreas de tabaco, que corresponde a \$801.600 por hectárea.

Teniendo como base que un horno tradicional cura 2. 5 hectáreas, lo que equivale a ocho horneadas aproximadamente, y que el “Horno de curado de tabaco por convección forzada USCO – MADR”, puede realizar el curado entre 5 y 6 días, se estima que con este equipo se puede llegar a curar por programa el equivalente a 3,5 o 4 hectáreas. Lo que permitiría realizar aproximadamente a 12 horneadas.

Para determinar el efecto económico de las cuatro horneadas adicionales que se pueden hacer con el “Horno de curado de tabaco por convección forzada USCO – MADR”, se realizó el análisis considerando la venta de este servicio. El valor pagado en la zona por el servicio de horneo es de aproximadamente \$750 por kilogramo de tabaco seco, lo que equivaldría a \$750.000 por horneada

De acuerdo a la tabla 12, la utilidad obtenida por la venta del servicio de una horneada en el horno tradicional es de \$155.000 y en el “Horno de curado de tabaco por convección

forzada USCO – MADR - 2” es de \$405.500. Con esto se obtiene que la utilidad posible en la venta de las cuatro horneadas adicionales sería de \$1.622.000 por programa.

**Tabla 11. Análisis de costos para la obtención de un kilogramo de tabaco seco, precios de referencia año 2007, TRM \$2100.**

DESCRIPCION DE COSTOS RELAVANTES	HORNO TRADICIONAL (\$)	HORNO “USCO - MADR 1” (\$)	HORNO “USCO - MADR 2” (\$)
Costo del hornero	150	75	75
Costo combustible carbón	400	-	-
Costo del combustible: cisco incluyendo empacado	-	81.5	81.5
Consumo energía eléctrica	-	272	158
Mantenimiento	45	30	30
Costo por kilogramo de tabaco seco	<b>595</b>	<b>458.5</b>	<b>344.5</b>

**Tabla 12. Análisis de costo y utilidad en venta del servicio de horneada (1 Ton tabaco seco)**

DESCRIPCIÓN	VR/ UNITARIO	VR/TOTAL	UTILIDAD
Ingreso por venta del servicio en un horno tradicional	750	750000	
Costo horneada en el horno "USCO- MADR 2"	344.5	344500	405500
Costo horneada tradicional	595	595000	155000

También se puede analizar el caso de que los hornos se utilicen únicamente para la venta del servicio de curado, con lo que al año se podrían vender como mínimo veinticuatro horneadas, lo que equivale a una utilidad de \$9.732.000. Esto permitiría recuperar la inversión adicional en dos años y medio, considerando que el valor del equipo intercambiador de calor y las adecuaciones civiles del “Horno de curado de tabaco por convección forzada USCO – MADR”, son de aproximadamente \$21.328.000.

Con base en el anterior análisis, se puede concluir que la adecuación del horno tradicional desarrollada en el presente trabajo, denominada “Horno de curado de tabaco por convección forzada USCO – MADR” y con las modificaciones del ventilador propuesto, es promisoría.

Además, es de anotar que el implementar esta tecnología permite un menor impacto ambiental de los gases de emisión, mejores condiciones de trabajo para los operarios, mayor número de personas contratadas para el funcionamiento del horno, facilidad en el manejo de la tecnología implementada y posiblemente una mayor capacidad de cargue del horno al incrementarse el número de barrederas disponibles.

## CONCLUSIONES

El “Horno de curado de tabaco por convección forzada USCO – MADR” permitió el manejo controlado y estable de las condiciones ambientales dentro del recinto, durante las tres fases de curado.

El equipo instalado dosifica automáticamente, requiriendo alimentar la tolva, con que viene el equipo, en periodos de aproximadamente cinco horas en la etapa de

amarillamiento y dos horas en secado de paño y secado de vena. La tolva puede ser ampliada para permitir alimentación en periodos de seis a ocho horas.

El manejo del equipo es sencillo y permite incrementar la temperatura de una fase a otra de manera gradual, lo que combinado con el manejo de las compuertas tipo persiana, ayudan a mantener las condiciones requeridas al interior del recinto en cada fase.

Con la utilización del intercambiador de calor por convección forzada, se elimina el problema de las fluctuaciones de temperatura tan drásticas que se presentan en el horno tradicional de curado por convección natural, reportadas en la evaluación realizada por Cerquera, N. et al, 2006, lo que garantiza un mejor control sobre las variables de curado.

El consumo promedio de cisco durante la fase “amarillamiento” es de 8.92 kilogramos por hora, en la fase de “secado de paño y fijación de color” de 17.75 kilogramos por hora y en la fase de “secado de vena” de 19.29 kilogramos por hora

El equipo instalado y operado con cisco de café, presentó, en algunos casos, inconvenientes para subir la temperatura en la fase de secado de vena, esto se solucionó cambiando la relación de los piñones del motorreductor, lo que permitió una mayor dosificación de combustible por unidad de tiempo, sin que ello generara inconvenientes en la combustión del mismo.

Las adecuaciones realizadas en el “Horno de curado de tabaco por convección forzada USCO – MADR” permiten hacer la alimentación del aire por la parte inferior o por la parte superior del recinto, esta inversión de flujo dio mejores resultados, en términos de homogeneidad del curado, al realizarla cada ocho horas.

Este sistema minimiza en gran parte la posibilidad de generar incendios que conllevan a la pérdida total del tabaco y de la infraestructura.

Se encontró que la eficiencia del intercambiador de calor, empleando cisco de café como combustible, fue del orden del 68%.

El “Horno de curado de tabaco por convección forzada USCO – MADR” puede realizar el curado en periodos de aproximadamente cinco a seis días, lo que permitiría curar tabaco proveniente de 3.5 a 4 hectáreas.

Haciendo un análisis de los costos directamente afectados por la implementación del “Horno de curado de tabaco por convección forzada USCO – MADR - 2”, se encontró que los mismos se ven reducidos en un 42%.

La adecuación del horno tradicional desarrollada en el presente trabajo, denominada “Horno de curado de tabaco por convección forzada USCO – MADR” con la adaptación del ventilador axial propuesto, es promisoria.

Con el sistema de humidificación por nebulización adaptado al horno, se logra incrementar rápidamente la humedad relativa del aire dentro del recinto, hasta niveles que permiten humedecer la hoja de tabaco para acondicionarla a las condiciones requeridas para el descargue y desencuje, reduciendo las pérdidas y permitiendo, si así se requiere, el envío de la hoja directamente a la sala de clasificación.

## **BIBLIOGRAFÍA**

CERQUERA P. Néstor E., CARVAJAL S. Fernanda, RUIZ O, Yaneth L Evaluación del secado en los hornos tradicionales de curado de tabaco. Neiva, Marzo de 2006.

CERQUERA P. Néstor E., RUIZ O, Yaneth L 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. Neiva, 2007. 136 p.

HOLMAN, J.P. Transferencia de calor. 8 ed. España: McGrawHill, 1998. P 195.

OAC INTERNATIONAL. Official Methods of Analysis of AOAC International. 16 ed. Maryland, 1998. v 1, p 28.

PROTABACO S.A. y Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. Diseño de Hornos Modulares para el Curado de Tabaco Virginia y Construcción de un Prototipo para realizar Pruebas de Eficiencia. Convenio 058-04. 15 Noviembre de 2005. Pg 3 y 4

ROA M, Gonzalo., et al. Beneficio ecológico del café. CENICAFE. Colombia, 1999. 166 p.

SALINAS TEJADA FABIO. Manual para el cultivo de tabaco. Universidad Surcolombiana USCO. p. 149.

SERVICIO NACIONAL DE APRENDIZAJE SENA REGIONAL SANTANDER. Proceso productivo del tabaco rubio y/o negro para la fabricación de cigarrillos [CD ROM]. Santander: SENA. Modulo 4: Proceso de curado. 2005. p. 18-19