

## EVALUACIÓN ENERGÉTICA DE UNA ESTUFA BULK CURING PARA SECADO DE TABACO EN SALTA, ARGENTINA

Ing. Fabiana Altobelli\* - [fabia\\_altobelli@yahoo.com.ar](mailto:fabia_altobelli@yahoo.com.ar)  
Dr. Miguel Condori\* - [miguel.angel.condori@gmail.com](mailto:miguel.angel.condori@gmail.com)  
Ing. Gabriel Díaz Russo\*<sup>†</sup> - [gabriel.diazrusso@gmail.com](mailto:gabriel.diazrusso@gmail.com)  
Lic. Gonzalo Durán\* - [gondur99@yahoo.com.ar](mailto:gondur99@yahoo.com.ar)

\*Instituto de Investigación en Energías no Convencionales (INENCO)  
Consejo Nacional Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)  
Universidad Nacional de Salta (UNSa)

<sup>†</sup>Programa Cambio Climático, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable.  
Provincia de Salta, Argentina.

Tema 2 Conversión térmica de la energía solar

**Resumen.** Se presentan los resultados obtenidos al efectuar una evaluación energética del comportamiento de una estufa de curado de tabaco del tipo bulk-curing en la localidad de Chicoana, provincia de Salta. Las mediciones fueron registradas durante un período de secado utilizando un sistema de medición automatizada compuesto de termocuplas tipo K y dispositivos de medición de humedad conectados a un sistema de adquisición de datos. Se efectuaron también mediciones de la cámara de secado en funcionamiento con el empleo de una cámara termográfica, y mediciones del caudal de aire caliente de ingreso. Se aprecia que las mayores pérdidas térmicas se generan en el suelo y la parte basal de las paredes perimetrales. También se observa que el aire caliente ingresa y se distribuye en la cámara de secado de forma no uniforme, lo que puede acarrear alteraciones en la calidad del producto seco debido a diferencias en la velocidad de secado. Los cálculos de eficiencia energética realizados demuestran que solamente un 30% de la energía suministrada (gas natural y electricidad) es efectivamente empleada para el secado de las hojas. Las pérdidas térmicas en techo y paredes son del orden de 1366277.66 kJ, mientras que aquellas correspondientes a puentes térmicos se hallan en 140400.98 kJ. Esta evaluación constituye el primer paso en dirección a la incorporación de energía solar como fuente térmica durante el proceso de curado de tabaco.

**Palabras-claves:** Estufa de secado, Secado de tabaco, Eficiencia energética, Ahorro de energía.

### 1. INTRODUCCION

En los últimos tiempos la crisis energética se ha vuelto moneda corriente a nivel global (United Nations, 2006), Argentina y la provincia de Salta no se encuentran ajenas, destacando la necesidad de direccionar las acciones a la disminución del consumo de energía convencional. Partiendo de esta premisa, y acompañando al desarrollo e inserción de fuentes de energía alternativas, renovables y limpias; surge la necesidad de mejorar la eficiencia de los dispositivos industriales actuales (apuntados como de uso energético intensivo). Se entiende ésta como la única vía para sustentar los niveles productivos y de crecimiento en el futuro.

La provincia de Salta, ubicada al noroeste de la República Argentina presenta en la producción tabacalera una de sus principales actividades económicas. Con una producción anual que ronda los 40 Mkg de tabaco curado, que requiere para ello aproximadamente 40 Mm<sup>3</sup> de gas. Según datos de la Dirección Provincial de Estadísticas y Censos, entre las exportaciones salteñas del año 2005, el Tabaco Virginia desnervado fue comercializado por un valor de 63,6 millones de dólares, ubicándose luego del rubro Combustibles (363,8 millones.) y en una posición anterior a la Soja (43,5 millones), situación similar a aquella reportada durante los primeros 8 meses de 2006. Para este nivel de producción son requeridos aproximadamente más de cincuenta mil obreros (Cornejo y Fiore, 2004), denotando la importancia socio-económica de la actividad en la provincia.

La localidad de Chicoana, en particular, se posiciona como la principal área en la producción de tabaco tipo "virginia", dadas las condiciones climáticas y edafológicas que imperan en la zona.

Existe en toda la zona tabacalera una extensa red de aprovisionamiento de gas natural para el secado de tabaco, a la cual tiene acceso la mayoría de los productores. Sin embargo, en los últimos años y dada la escasez de gas que viene aquejando al país, dichos productores han sufrido recortes en el suministro y encarecimientos considerables de sus costos.

El presente trabajo se halla enmarcado en un proyecto de investigación dirigido a lograr una mejora técnica en la eficiencia energética de las estufas de tabaco y la incorporación del uso de energías alternativas (energía solar, dada la disponibilidad del recurso en la zona). Se presenta una evaluación realizada a una estufa típica del Valle de Lerma, cuyo objetivo fue el de identificar los aspectos energéticos susceptibles de optimizarse.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. La estufa

La estufa de curado empleada en la medición comprende una estufa de tipo bulk-curing, la misma presenta dos “túneles”, con un ancho exterior total de 3.12m (cada túnel posee 1.5m), un largo de 12m y una altura de aprox. 3.47m, la estructura del túnel está conformada por caños estructurales metálicos de 40mm x 20mm. Tanto las estructuras de paredes como la del techo se encuentran revestidos en el interior y el exterior con chapas galvanizadas onduladas, con aislación de lana de vidrio entre ellas. El piso, por su parte, es de tierra, sin ningún tipo de terminación ni aislación térmica, y tiene una pendiente del orden del 1% hacia la puerta de carga. La parte basal de las paredes perimetrales y puerta se halla construida con mampostería (construcción de ladrillos y cemento) de una altura de 0.5m (Fig. 1).

El abastecimiento energético es proporcionado a través de un quemador de gas natural, el cual se encuentra conectado a un intercambiador de calor indirecto del tipo gas-aire que evita el ingreso a la cámara de secado de los gases provenientes del proceso de combustión, impidiendo la formación de nitrosaminas (cabe aclarar que en este caso se trata de un requerimiento establecido por los estándares de calidad del producto final, y la OMS con adhesión del gobierno argentino). Al mismo tiempo, el ingreso y la circulación del aire es llevado a cabo por un ventilador eléctrico centrífugo, donde la turbina es alimentada por un motor de 5.5HP que gira a 1400 RPM. Este motor se conecta a la turbina con un sistema de poleas dobles, con una reducción de 30cm a 15cm.

La abertura de entrada de aire caliente a la cámara se ubica en la parte inferior de la pared posterior de la cámara, ocupando un rectángulo de 0.5 m. x 1.24 m de superficie. A su vez, en la parte superior de esta misma pared, se encuentra la abertura que permite la recirculación del aire entre la cámara y el intercambiador de calor. Por otro lado, los gases de combustión generados por el quemador son enviados al exterior a través de dos conductos que atraviesan la cámara por la parte interna superior, culminando en dos chimeneas ubicadas por encima de las puertas de entrada de la estufa.

La carga de tabaco se realiza con “peines”, estos comprenden estructuras metálicas en forma de U, con una serie de pinches. En estos peines se insertan las hojas de tabaco, las cuales quedan colgadas el de ubicarse los peines en las tres hileras de rieles que posee cada nave de la estufa. La disposición dada a las hojas debe ser lo más uniforme posible, lo mismo que el cargado de la estufa, de manera de generar una masa homogénea para el secado (Ulivarri, 1990).

El proceso de curado de tabaco consta de cuatro etapas definidas a partir de las reacciones físico-químicas que se suceden y en base a los valores de temperatura y humedad que deben alcanzarse. La primera etapa se denomina “amarillamiento”, comprende la elevación de la temperatura del recinto hasta 35°C, con recirculación de aire, trabajando en un ambiente saturado de humedad. Esto posibilita la oxidación de la clorofila contenida en las hojas dejando xantofilas y carotenos (estos dan a la hoja la coloración amarillenta), y se define como una continuación de la maduración del tabaco en el campo. Paralelamente se suceden otro tipo de reacciones químicas que implican la hidrolización de azúcares complejos (almidón), la degradación de proteínas, etc. A continuación sigue la etapa de “fijación de color”, en la cual la temperatura se eleva paulatinamente hasta llegar a los 43°C. Ya no se suceden cambios químicos, sino que la eliminación del agua se produce solamente por evaporación. Esta fase es la de mayor importancia porque pueden generarse amarronamientos en el tabaco (bajando su calidad), por la combinación entre altas temperaturas y humedad. Seguidamente ocurre el “secado de lámina”, si bien todo el proceso de curado implica el secado de la lámina foliar, en esta fase la temperatura se eleva a razón de 2°C por hora hasta alcanzar los 60°C, primando los fenómenos evaporativos. Finalmente el curado concluye con el “secado de nervadura”, donde el objetivo es eliminar toda el agua contenida en la vena principal de la hoja, llegando a temperaturas cercanas a los 70°C. Previamente a descargar la estufa debe procederse a rehumectar el tabaco, impidiendo de esta manera que se quiebren por el manipuleo de las hojas secas (Eckhardt, 2002 y López Méndez, 2000).

En todo, el proceso de curado en estufas de curado en bulto, bulk-curing, demanda aproximadamente 7 días. Este período se ve altamente influenciado por las condiciones meteorológicas imperantes y la experiencia del operario a cargo de su control y determinación visual de cada etapa de secado.

Con respecto al consumo energético que involucra el curado, se utilizarán los datos reportados por Eckhardt (cit. op.), durante un ensayo realizado en estufas bulk-curing ubicadas en la localidad de Perico, provincia de Jujuy, los cuales muestran la duración del secado y el consumo en cada etapa (Tabla 1).

Tabla 1: Control de estufado (ensayo).

	Etapas de Secado				Total
	Amarillamiento	Fijado de Color	Secado de lámina	Secado de nervadura	
Tiempo (hs:min)	45:30:00	05:30:00	89:00:00	24:00:00	164:00:00
Consumo (m <sup>3</sup> )	111.09	17.41	1266.3	246.1	1640.9

Tabla 2: Consumo de gas por kg de tabaco curado (Eckhart, cit op).

Kgs	Carga (tabaco verde)	9698.74 kg
	Descarga (Tabaco curado)	1792.69 kg
	Agua evaporada	7906.05 kg
Consumo (m <sup>3</sup> )	Amarillamiento	111.09
	Marchitamiento	17.41
	Secado lámina	1266.30
	Secado nervadura	246.1
Total de Consumo Real		1640.90
m <sup>3</sup> /kg tabaco descargado		<b>0.915</b>

Si bien en la Tabla 2 Eckhardt (cit op) reporta un consumo de 0.915 m<sup>3</sup> de gas por kg de tabaco curado para el ensayo realizado, por convención generalizada se ha definido en el ámbito tabacalero un consumo promedio del orden de 1m<sup>3</sup> de gas por kg de tabaco. Un dato que conviene destacar es el hecho de que los datos presentados en la Tab. 1, muestran una relación entre el tiempo de secado y los m<sup>3</sup> de gas consumido, de aproximadamente 10m<sup>3</sup> por hora. Sin embargo, no es factible generalizar dicha relación, ya que la misma es altamente dependiente del contenido de humedad con el que ingresan las hojas y las condiciones atmosféricas, especialmente la humedad relativa durante el secado. Por experiencia generalizada es que se estima un total de siete días para todo el proceso.



Figura 1- Vista de frente de la estufa bajo estudio, y perspectiva de parque de estufado del establecimiento.

## 2.2. El sistema de medición

En total, se instalaron 14 sensores de medición de temperatura (termocuplas) y 2 de medición de humedad (marca Vaisala, modelo MDP40). Todos estos sensores fueron, a su vez, conectados a un dispositivo de adquisición de datos marca CAMPBELL, (CR23X Micrologger). Dicho dispositivo posee una memoria de estado sólido de 4 Megabytes y su autonomía estimada es del orden de 20 días (cubriendo de esta manera el ciclo completo de curado), y la frecuencia de toma de datos cada 30 segundos. Para ampliar la capacidad de medición de temperaturas se utilizó un multiplexor (CAMPBELL M25T), el mismo posee 25 entradas analógicas para toma de temperatura mediante termocupla y conexión mediante señal digital al datalogger previamente mencionado. Dichas conexiones fueron configuradas y se programó el intervalo de registro de datos, mediante el empleo de una laptop y el software provisto por Campbell. Para los fines de este estudio, y dada la longitud del proceso de curado (estufado), se optó por definir intervalos de 15 minutos (Fig. 2).

El registro de temperaturas fue llevado a cabo mediante el empleo de termocuplas tipo K convenientemente calibradas. Por su parte, para la medición de humedad, se utilizaron higrómetros de hilo caliente (VAISALA Modelo HM45D). En este caso, debido a las limitaciones del sistema de adquisición de datos, los sensores de humedad fueron configurados como sensores de voltaje diferencial de dos canales, donde el voltaje máximo (1000mV) corresponde a una humedad relativa ambiente de 100%. La señal fue entonces convertida y almacenada de forma tal que el resultado final comprende la humedad relativa con el cambio de escala correcto. En la Fig. 3 se muestra un esquema con la ubicación de los sensores.



Figura 2- Configuración y programación del sistema de adquisición de datos e instalación final.

**Registro de temperatura:**

Las mediciones de temperatura dentro de la cámara fueron divididas en tres sectores en sentido longitudinal (ingreso de aire caliente, sector medio, y puerta de salida). A su vez, en cada uno de estos sectores se buscó el registro de posibles variaciones en altura colocando en tres lugares distintos en sentido altitudinal, las correspondientes termocuplas. Por otro parte, fueron colocados sensores para medir la temperatura a la salida del quemador, así como la temperatura de los gases de combustión a la salida de las dos tuberías que funcionan como vías de evacuación.

Por último fueron colocadas dos termocuplas para el registro de las condiciones externas imperantes, una en el techo de la estufa, y otra en una de las columnas estructurales próximas al secadero que se tomó como temperatura ambiente (Fig. 3).

**Registro de humedad relativa:**

Los sensores de medición de humedad fueron ubicados en la abertura de ingreso de aire caliente a la cámara y en proximidades a las puertas de la estufa, cerca de la ventana superior por donde sale el aire húmedo. Dichos registros permiten evaluar la humedad relativa y específica con que ingresa el aire a la cámara y el valor de estas variables hacia la salida.

**Registro de flujos de aire**

Una vez concluidas las mediciones de humedad y temperatura, se procedió a evaluar el flujo de aire que ingresa a la cámara de secado. Para esto, fue empleado un anemómetro de hilo caliente marca TSI, modelo VELOCICALC8245, realizando las mediciones mientras la estufa se encontraba sin carga. El proceso consistió en la sectorización de la abertura de ingreso, que presenta una forma cuadrada de 50 cm de alto por 124 cm de largo, en tres filas y cuatro columnas, generando un total de doce sectores. Se efectuó entonces el registro de las velocidades de viento en los puntos centrales de cada sector, en un total de cinco repeticiones, variando la abertura de ingreso exterior de aire a la cámara donde se encuentra la turbina (cerrado, 1cm, 2cm, 3cm, 4cm). Los valores medidos de velocidad fueron multiplicados por el área correspondiente para determinar el flujo de aire en esa pequeña área. Posteriormente los flujos fueron representados para cada nivel de apertura de la ventana externa con el empleo del software Surfer, y el uso del módulo de interpolación lineal y de elaboración de curvas de nivel (contours).

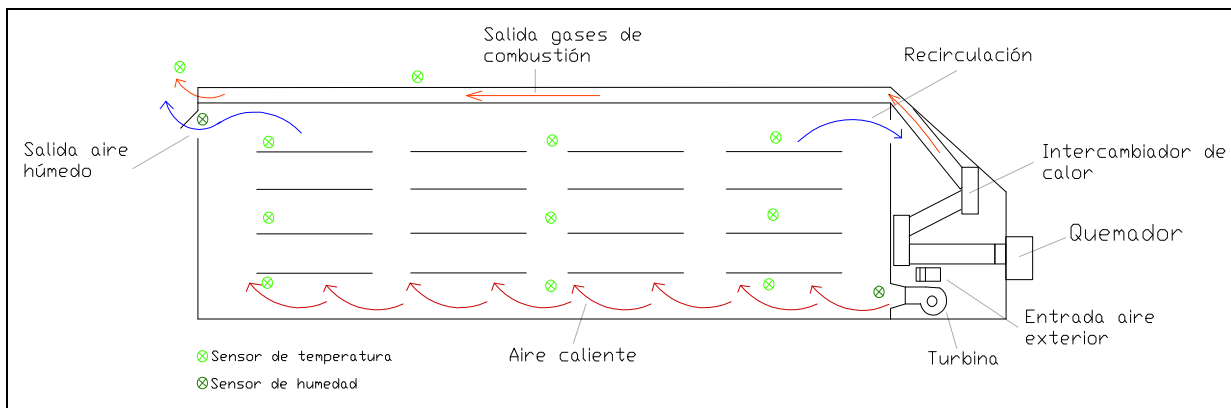


Figura 3- Esquema de funcionamiento de la estufa y de sensores instalados.

**2.3. Imágenes termográficas**

Con el empleo de una cámara termográfica marca HORIBA se obtuvieron imágenes de diferentes sectores externos de la estufa, mientras la misma se encontraba en funcionamiento. Dicho dispositivo realiza una toma

superpuesta de una fotografía digital adquirida mediante un sensor CCD, con una imagen termográfica obtenida en una grilla de 64bits. Este tipo de imágenes, con su correspondiente escala calorimétrica (derecha de la imagen), permite discriminar las temperaturas en las diferentes porciones de la estufa. La parte inferior de las imágenes muestra el valor de la temperatura a la altura del cursor (Fig. 7 y 8). Con el fin de destacar las diferencias térmicas entre la cámara de la estufa y el ambiente externo, se optó por registrar las imágenes durante el período nocturno.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1. Resultados de las mediciones de temperatura

Los registros de temperatura han sido graficados para la duración total del proceso de curado. A continuación se presentan los valores medidos por los sensores ubicados en la parte baja de la cámara, y en las tres posiciones longitudinales elegidas (Entrada de aire caliente, Medio y Salida) (Fig. 4). Dicho gráfico permite apreciar que al iniciarse el secado, la temperatura es aproximadamente homogénea, sin embargo, a medida que se avanza con el proceso y que las temperaturas van elevándose, las curvas se separan, debido al aumento de pérdidas térmicas. A partir del tercer día las diferencias de temperatura se vuelven notorias, siendo siempre mayores las correspondientes a la entrada de aire caliente a la cámara. Al finalizar el secado dicha diferencia es del orden de los 5°C en promedio, con picos de variación de 8°C. Esta situación puede ser explicada por las pérdidas térmicas existentes en el sector basal de la cámara la cual no poseen ningún tipo de aislación, tanto en el piso como en la parte inferior constituido por paredes de mampostería. De esta manera el aire caliente que ingresa a la cámara va perdiendo temperatura a medida que circula por el ducto inferior, conformado por el piso, las paredes laterales y los peines con hojas, hasta llegar a la puerta de la estufa. Lo trascendental de estas divergencias de temperatura se encuentra en el secado irregular de las hojas. Aquellas ubicadas en proximidades del ingreso de aire caliente soportan temperaturas mayores, durante todo el curado, a las instaladas cerca de la puerta. Como resultado de esto pueden aparecer coloraciones marrones en la lámina de las hojas pobremente curadas, y signos de quemado en las que experimentan el exceso de temperatura.

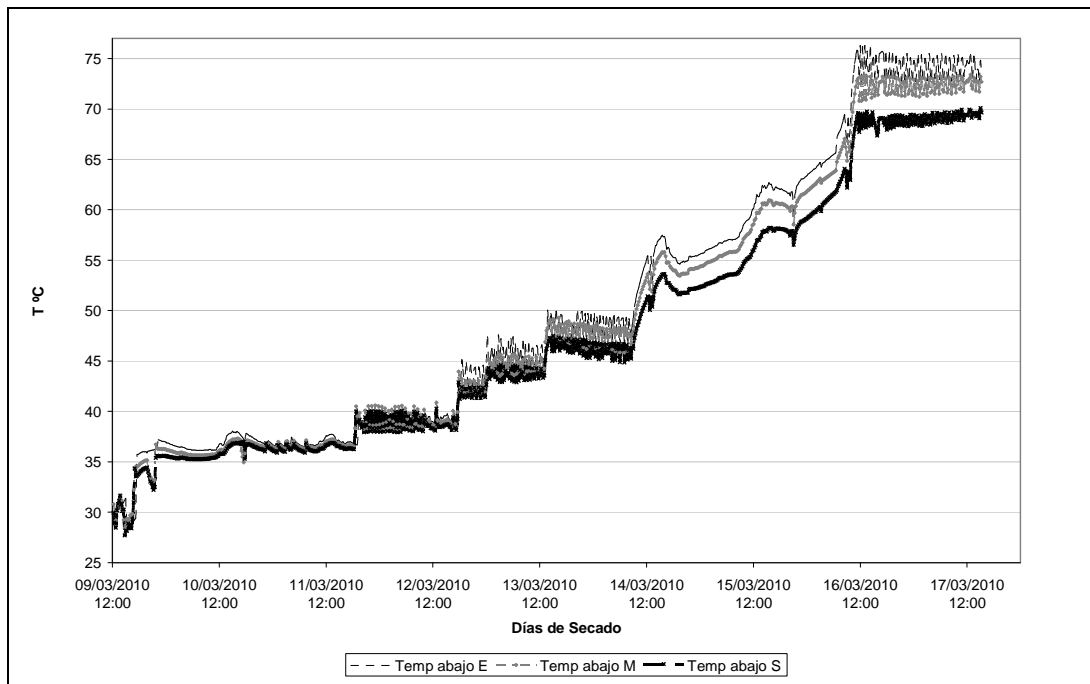


Figura 4- Mediciones térmicas de la parte inferior de la cámara de secado.

En la Fig. 5 puede verse como en altura también se producen diferencias de temperatura durante el secado. La curva correspondiente al sector basal de la cámara presenta valores mayores que las otras. Dichas diferencias en etapas iniciales no son mayores a los 2°C, sin embargo, a partir del cuarto día son del orden de 5°C. Estas diferencias también pueden dar lugar a secado desigual de la masa de hojas, resultando en una calidad no óptima del producto final. Hacia el último día las curvas se homogenizan revelando la desaparición de las variaciones térmicas, esto se debe a que al estar seca las hojas, los peines permiten mayor paso de aire favoreciendo la uniformidad por mezclado del aire.

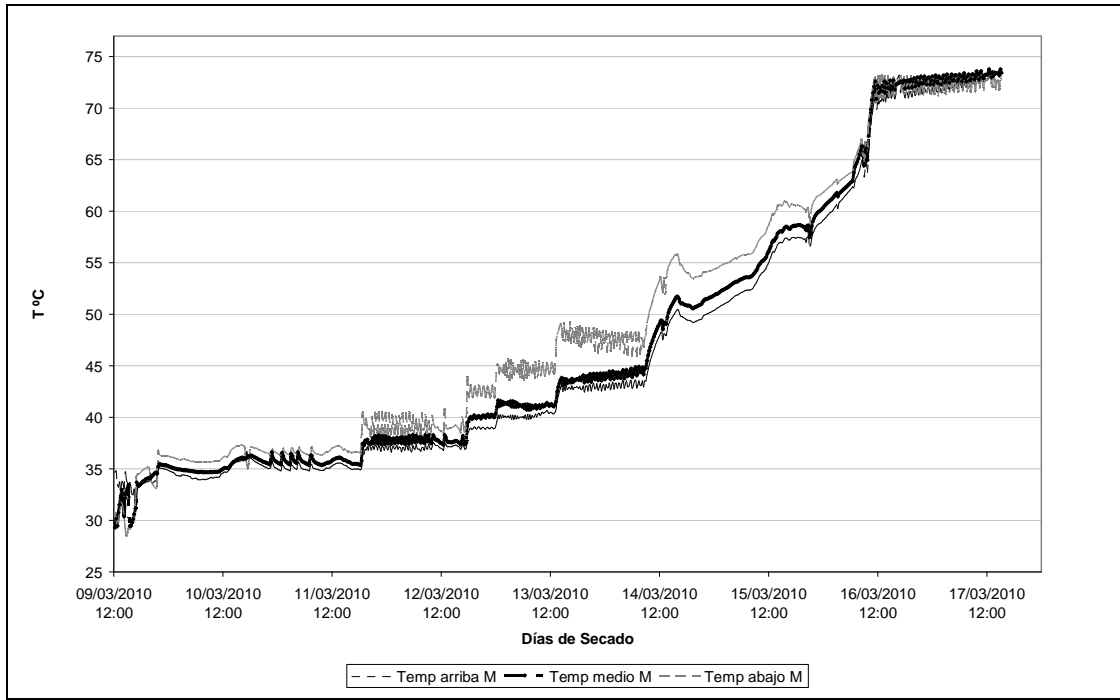


Figura 5- Mediciones térmicas en la parte media entre la entrada de aire y la puerta de la cámara.

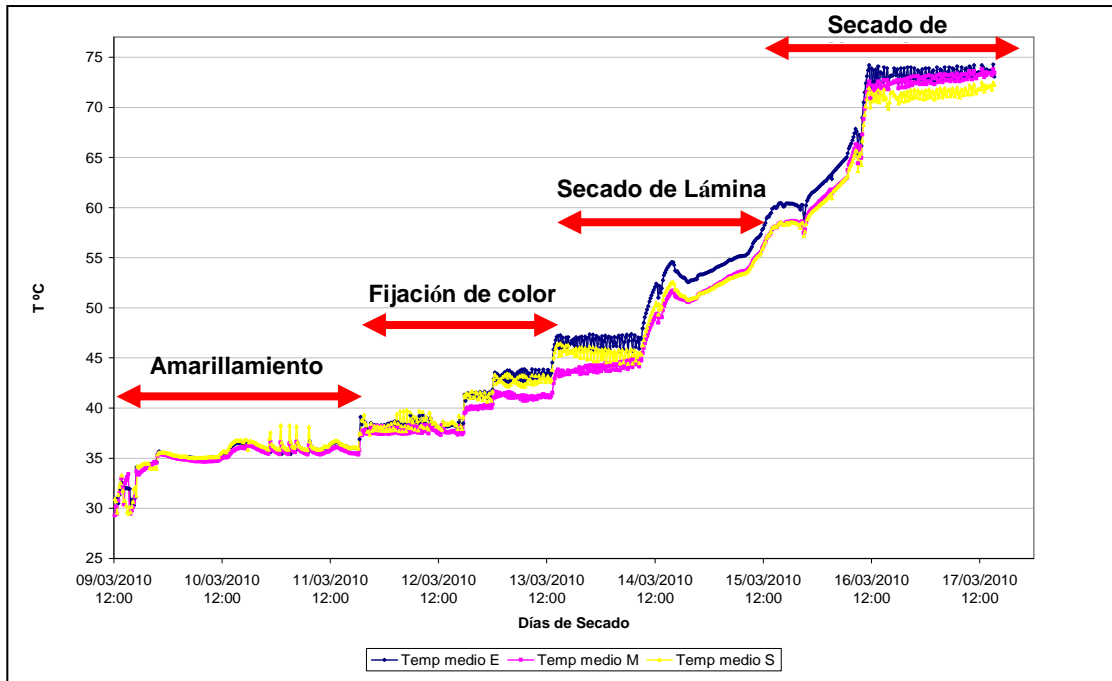


Figura 6- Delimitación de etapas del curado en curvas de temperaturas medidas

En todos los casos, pudo identificarse que los valores de temperatura acompañan a aquellos establecidos como curva de secado para el tabaco, pudiendo demarcarse claramente las etapas de este proceso. La Fig. 6 muestra la variación en la temperatura del aire a lo largo de la cámara para el sector medio de la misma. Se observa cómo a partir del final de la etapa de fijación de color se producen crecientes diferencias de temperatura indicando posible secado desparejo de las hojas ubicadas cerca de la puerta de carga y descarga respecto de las que están en una posición de mayor proximidad al ingreso de aire caliente.

**3.2. Resultado de las imágenes termográficas**

Las imágenes logradas con la cámara termográfica permiten observar la existencia de puentes térmicos y pérdidas de calor hacia el exterior. Las coloraciones rojizas de estas fotografías representan los sectores de mayor temperatura. Por ejemplo, en la Fig. 7 y 8, donde se muestran áreas de la bisagra, picaporte y la parte inferior central de la puerta, se

observa la presencia de pérdidas. Al momento de registrar estas imágenes el interior de la estufa se hallaba a una temperatura cercana a los 70°C, de acuerdo a las escalas térmicas de las fotografías se aprecian valores próximos a los 30°C en la bisagra, 51 °C en picaporte y a los 58°C en la parte inferior central, mientras el resto de la superficie de la puerta esta sólo por encima de los 20 °C. Esta situación se debe a la existencia de pérdida de flujo de aire debajo de las puertas de la cámara y picaporte, y de puentes térmicos en la bisagra.

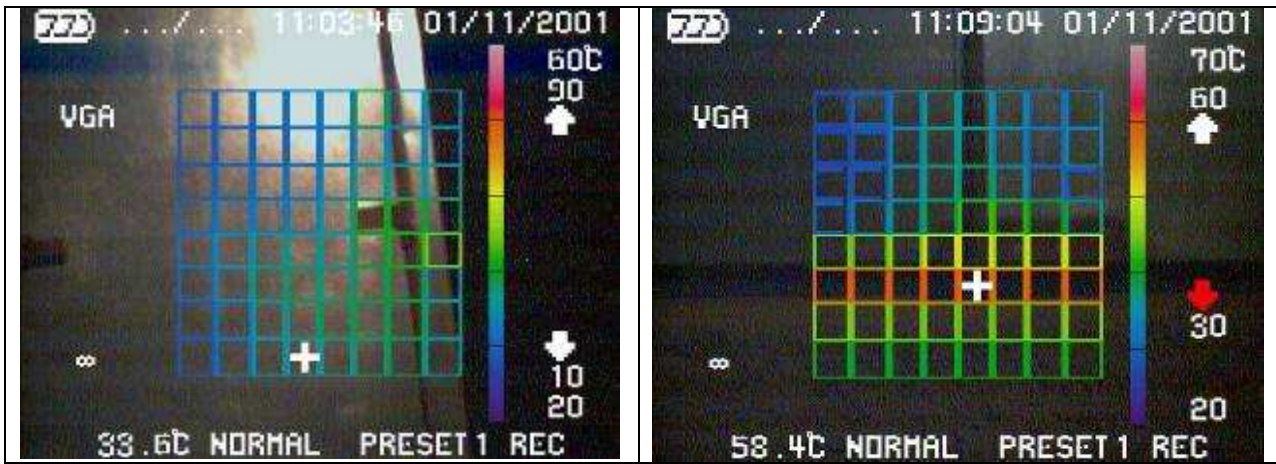


Figura 7 – Bisagra derecha de la puerta de carga (izquierda). Porción inferior central de las puertas (derecha).

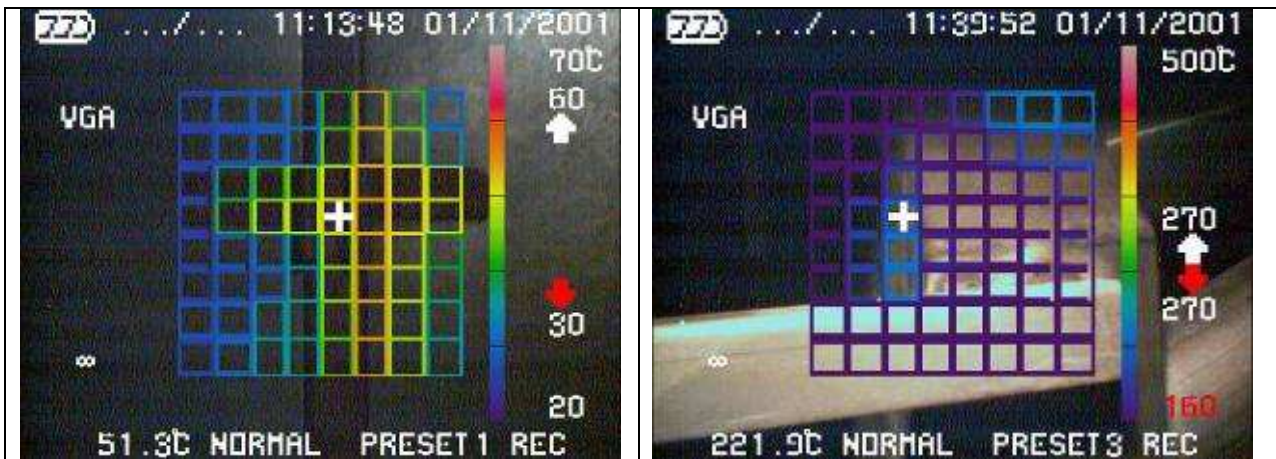


Figura 8 - Unión de las puertas a la altura de picaporte (izquierda). Intercambiador de calor (derecha).

Para medir la temperatura alcanzada por la superficie externa del intercambiador de calor, se registró la imagen derecha de la Fig. 8, en la misma puede verse que la superficie del mencionado intercambiador se hallaba a 250°C aproximadamente. Por otro lado, se tomó también una imagen de la parte externa del quemador de gas de la estufa y sus controladores, en la misma se evidencian igualmente pérdidas ya que los caños de conducción del combustible gaseoso se encuentran a una temperatura del orden de 50°C muy superior a la ambiente, que para esos momentos era del orden de los 18°C.

### 3.3. Resultado de las mediciones de Flujo

El resultado más destacable y evidente al que se puede arribar implica la desigual distribución de los valores del flujo de aire, donde los máximos se concentran en la parte central inferior (sectores de tonalidad oscura en las Fig. 9 a 13) y los mínimos (con valores muy bajos) hacia la porción superior izquierda. A medida que disminuye el aire de recirculación, correspondiendo con el aumento de la apertura de la toma de aire ambiente por la turbina, los mayores flujos se desplazan hacia el lado izquierdo y hacia abajo. Esta situación debe ser tenida en cuenta ya que puede dar lugar a secados desiguales o irregulares que terminarán afectando la calidad del producto. El valor medio de flujo másico obtenido se halla en el orden de 0.4m<sup>3</sup>/s, con mínimos cercanos a 0.039m<sup>3</sup>/s y máximos de 0.81 m<sup>3</sup>/s. Por otro lado, no pudieron apreciarse diferencias significativas en referencia a variaciones en el ingreso de aire externo dado por la variación apertura de la ventanilla trasera de la estufa.

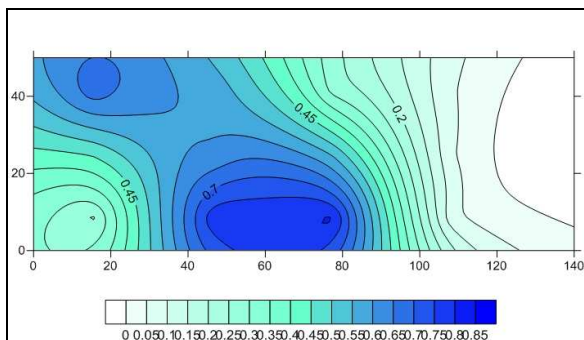


Figura 9 – Modelización del flujo medido en el ingreso de aire caliente (cerrado).

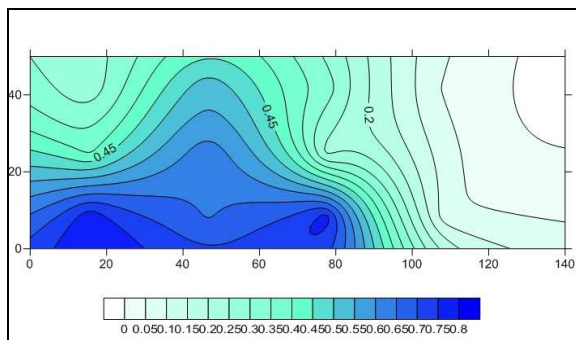


Figura 10 – Modelización del flujo medido en el ingreso de aire caliente (1cm de apertura).

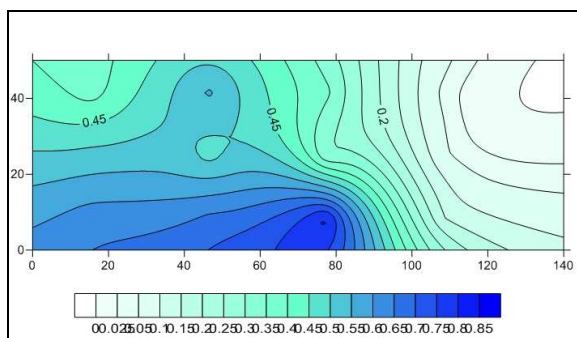


Figura 11 – Modelización del flujo medido en el ingreso de aire caliente (2cm de apertura).

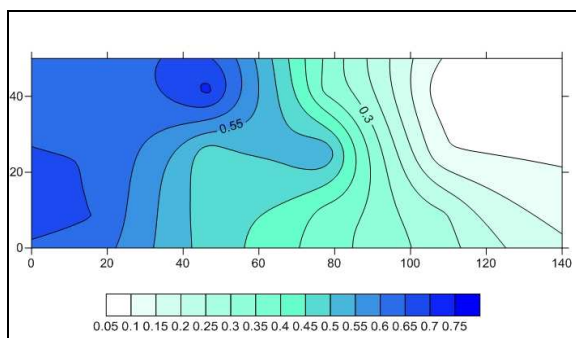


Figura 12 – Modelización del flujo medido en el ingreso de aire caliente (3cm de apertura).

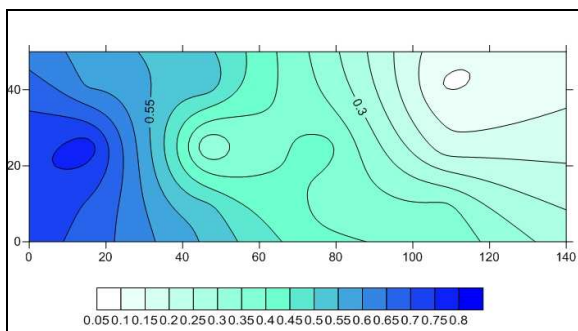


Figura 13 – Modelización del flujo medido en el ingreso de aire caliente (4cm de apertura).

### 3.4. Eficiencia energética de la estufa

Para el cálculo de la eficiencia energética que posee la estufa de tabaco tipo bulk-curing ensayada, fueron empleados los datos de consumo de combustible obtenidos por Eckhardt (2002) con una estufa similar, en la localidad de Perico, provincia de Jujuy. En este se aprecia que las mediciones del gas consumido por una estufa para completar el proceso de secado, fueron de 1640,9 m<sup>3</sup>. Asumiendo que el poder calorífico medio para el gas natural en la República Argentina, y según consta en el ENARGAS, es de 9300kcal/m<sup>3</sup>; se obtuvo un valor energético de 63879908.8 kJ para ese nivel de consumo. Con el fin de contabilizar la totalidad de energía empleada en el proceso de curado, debió sumarse a este valor el correspondiente al consumo eléctrico del motor de 5.5HP que mueve la turbina de la estufa. Empleando las horas totales que involucró el proceso de secado (164 hr), se obtuvo un consumo de 2422411.2 kJ, para dar un total de 66302320 kJ entre el consumo de gas y el eléctrico.

El otro parámetro necesario para la determinación de la eficiencia energética de la estufa comprende el cálculo de la energía efectivamente utilizada en el secado. Dicho valor surge de evaluar el volumen de agua evaporado de las hojas y el calor latente invertido en la vaporización de esta agua contenida en los tejidos vegetales. El valor empleado en los cálculos fue de 2450kJ/kg, la diferencia en peso entre la carga de tabaco y la descarga permite conocer los kilos de agua que fueron evaporados durante el secado, siendo para este caso de 7906.05kg. La energía utilizada en la vaporización del agua contenida en las hojas fue en este caso 19369822.5kJ.

$$\eta = \frac{E^{\circ} \text{ empleada}}{E^{\circ} \text{ entregada}} = 0.2921 \tag{1}$$

La relación entre la cantidad de energía consumida durante el secado y la que efectivamente es utilizada para la evaporación del agua contenida en las hojas brinda una idea de la eficiencia de la estufa, sin embargo, es necesario realizar un balance térmico completo que incluya el cálculo total de las pérdidas detectadas para arribar a resultados precisos sobre la eficiencia térmica del dispositivo.

Como aproximación a la cuantificación detallada de las pérdidas térmicas de la estufa, fueron empleado los resultados de las mediciones térmicas de la experiencia. De esta manera, fueron evaluadas las pérdidas correspondientes al techo y paredes perimetrales del dispositivo. Dado los materiales de construcción empleados en los mismos (Ver sección 2.1. La estufa), se utilizaron coeficientes convectivos de  $30\text{W/m}^2$  entre el interior de la cámara y la pared interna, y de  $14\text{W/m}^2$  entre la pared externa y el ambiente. Al considerar la aislación de lana de vidrio existente entre las chapas onduladas de las paredes se definió un coeficiente conductivo de  $0.04\text{ W/m}^\circ\text{C}$  (Duffie y Beckman, 2006), para un espesor de  $0.05\text{m}$ . La superficie total de pérdida fue medida en un valor de  $102.72\text{ m}^2$ . Los resultados, evaluados para la duración de todo el proceso de secado, en función de las variaciones de temperatura con las que se contaba, en intervalos de 15 minutos, son mostrados en la Fig. 14. Hacia el final del proceso el valor total de las pérdidas generadas en el techo y las paredes de la cámara de secado resultó de  $1366277.66\text{ kJ}$ .

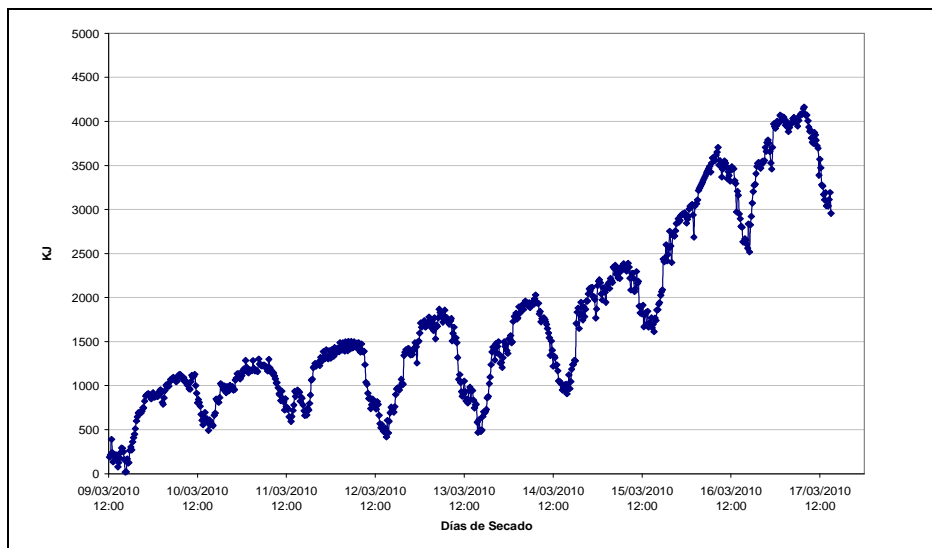


Figura 14- Pérdidas calculadas a través de techo y paredes de la estufa a lo largo del secado.

Por otro lado, fueron consideradas las pérdidas correspondientes a los puentes térmicos de la estructura de la estufa. Dichos puentes térmicos están constituidos por caños estructurales de hierro cuyas dimensiones son  $40\text{mm}$  de ancho por  $20\text{mm}$  de espesor. Los mismos carecen de aislación en su interior y se hallan en contacto directo con las chapas internas y externas de la estufa. El área considerada de pérdida fue de  $0.96\text{m}^2$ , se utilizaron coeficientes convectivos de  $30\text{W/m}^2$  entre el interior de la cámara y la pared interna, y de  $14\text{W/m}^2$  entre la pared externa y el ambiente, y un coeficiente de conducción de  $80.2\text{ W/m}^\circ\text{C}$ , ante la falta de material aislante en el interior de los caños (Duffie y Beckman, cit op). Para este caso, las pérdidas calculadas fueron del orden de  $140400.98\text{ kJ}$ . Este último valor puede ser considerado bajo en relación al correspondiente al techo y paredes, sin embargo, esto es debido a la pequeña superficie de intercambio que representan los mencionados puentes en relación a las dimensiones totales de la estufa.

Quedan aún por determinarse las pérdidas generadas hacia el suelo de la estufa, el cual carece totalmente de aislación y se encuentra humedecido durante la totalidad del proceso; así como las pérdidas a través de la mampostería basal de las paredes y las correspondientes al flujo de aire caliente de salida de la cámara.

#### 4. CONCLUSIONES

Se ha realizado la medición de parámetros tendientes a la evaluación energética de una estufa de curado de tabaco tipo bulk-curing y se ha determinado la eficiencia térmica del sistema. Puede verse claramente a partir de las medidas realizadas la existencia de pérdidas térmicas durante su funcionamiento. Dichas pérdidas ocurren principalmente en la parte basal de las paredes, debido al material del cual están constituidas y la carencia de aislación. Por otro lado, otra fuente importante de pérdida corresponde al suelo de la estufa, el cual se encuentra totalmente desnudo, y generalmente húmedo, constituyéndose en otra masa para el proceso de secado. También pudieron detectarse la existencia de puentes térmicos en la estructura del interior de la cámara que contribuyen a las pérdidas de calor por conducción, siendo mayormente notorias en las esquinas de la estufa. En las imágenes termográficas captadas se aprecia la existencia de pérdidas en bisagras y picaporte de las puertas de la estufa. Como mejora a proponer se debe incluir, en consecuencia, la incorporación de burletes de gomas en puertas y ventanas, colocación de aislación térmica en suelo y muro perimetral y un mejor diseño que evite los numerosos puentes térmicos de la estructura metálica.

Con respecto al flujo de ingreso de aire caliente a la cámara de secado, para el caso del dispositivo bajo análisis, puede verse una clara distribución irregular. Esta situación puede generar problemas en la calidad final del tabaco al no homogenizar adecuadamente el secado de las hojas. Siendo éste otro punto para optimizar por parte de los productores.

Las medidas de temperaturas mostraron también la existencia de una desigual distribución del aire en la zona baja de la estufa. Esto puede ser fuente de curado desigual del tabaco en sentido longitudinal y en altura. El suelo en esta zona presenta una leve pendiente a fin de compensar las pérdidas de carga por roce, la cual no es suficiente y no asegura la conservación de la velocidad del aire.

Por último, los cálculos realizados para estimar la eficiencia en el uso del combustible para el curado demuestran un desempeño energético deficiente, pudiendo considerarse que cerca del 70% de la energía suministrada (incluyendo el gas del quemador y la electricidad para el funcionamiento de la turbina) se pierde ya sea con el aire húmedo que abandona la cámara o como pérdidas térmicas al ambiente. Los cálculos referidos a las pérdidas térmicas generadas a lo largo del techo y las paredes perimetrales del dispositivo (construidos en chapa galvanizada doble con aislación de fibra de vidrio), revelan un valor final del orden de los 1366277.66 kJ; mientras que las pérdidas correspondientes a los puentes térmicos de la estructura han sido calculadas en 140400.98 kJ. Se hace necesario continuar con un estudio más detallado a fin de determinar cuánto de esta pérdida de energía puede ser evitada mediante la introducción de mejoras.

La idea global del trabajo realizado consistía en la evaluación del desempeño actual de las estufas de tabaco, para plantear en un futuro la incorporación de energía solar como fuente térmica para el proceso.

## 5. REFERENCIAS

- Cornejo, M.; Fiore, I. 2004. El cultivo de tabaco en el Valle de Lerma – Salta. Hoja informativa N° 22. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Unidad de Extensión y Experimentación Adaptativa (UEEA) Valle de Lerma.
- Duffie J. A.; Beckman W. A. 2006. Solar Engineering of Thermal Processes, 3<sup>o</sup> edition. Wiley Interscience, New York.
- Eckhardt, M. A. 2002. Las empresas transnacionales tabacaleras: Recuperación de una pasantía de pregrado universitario en una empresa en la provincia de Salta. Seminario de integración. Facultad de Ciencias Naturales. Universidad Nacional de Salta.
- Fernández de Ulivarri, D. 1990. El cultivo de los tabacos claros. Manual 1. Centro Regional Salta-Jujuy, Estación Experimental Salta. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). Salta, Argentina.
- Lopez Méndez, A. El curado del tabaco Virginia en España. Manual práctico para todos los agricultores. Enciclopedia básica del cultivo de tabaco.
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentación de la República Argentina (SAGPyA). Proyecto Tabaco, su compromiso ambiental y responsabilidad social. Argentina.
- United Nations, 2006. Energy for all. United Nations Commission on Sustainable Development, Sustainable Development in action. Backgrounder May 2006.

## ENERGETIC EVALUATION OF A BULK CURING BARN FOR TOBACCO DRYING IN SALTA, ARGENTINA

**Abstract:** *The results obtained from an energetic assessment carried out to evaluate the performance of a tobacco barn (bulk-curing model) in the town of Chicoana, Salta province, are presented. Measurements were recorded during a drying period using an automated measurement system consisting of K-type thermocouples and humidity measuring devices connected to a data acquisition system. It was also recorded the barn during the drying process with the use of a thermal camera and at the same time was assess the income hot air flow. The greatest heat losses correspond to the soil and the basal part of the walls, these areas lack of any thermal insulation. On the other hand the air entering to the chamber is not uniform, which may lead to alterations in the quality of the dried product due to differences in the rate of drying. Efficiency calculations show that only 30% of the energy supplied (natural gas and electricity) is effectively use for drying the leaves. The heat losses in the ceiling and walls of the barn are about 1366277.66 kJ, while those referred to the thermal bridges are of 140400.98 kJ. This assessment implies the first step towards the incorporation of solar energy as heat source during the curing process of tobacco.*

**Keywords:** *Drying barn, Tobacco drying, Energetic efficiency, Energy saving.*