

AHORRO ENERGÉTICO DE UN SISTEMA DE PRECALENTAMIENTO DE AIRE EN ESTUFAS DE TABACO BULK-CURING

Fabiana Altobelli¹, Miguel Condorí¹, Gonzalo Durán¹, Ileana Cruz¹

¹Grupo de Eficiencia Energética y Desarrollo Socio-Productivo (GEEDESP) – Instituto de Investigaciones en Energía no Convencional (INENCO) - Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)
Av. Bolivia 5150 C.P. 4400 – Salta
Tel. 0387-4258709 e-mail: fabi_altobelli@yahoo.com.ar

RESUMEN: Se presentan los resultados obtenidos a partir de la intervención de una estufa de tipo bulk-curing para el curado de 8 toneladas de tabaco Virginia, en la localidad de Vaqueros, Salta, para producir ahorro energético en su consumo de gas natural con incorporación de energía solar y mejora de la eficiencia térmica del proceso. En dicha intervención se incorpora al techo de la estufa un sistema de precalentamiento de aire conformado por colectores solares y recuperación de calor residual de la combustión del quemador. Durante los años 2022-2024 se efectuaron ensayos de la estufa intervenida tanto en vacío como con carga de hojas de tabaco. Los resultados de los ensayos realizados dan cuenta de ahorros del orden del 40 % en el consumo de gas para un proceso completo de curado, con la incorporación del sistema de precalentamiento propuesto. Considerando los costos de inversión necesarios, y los ahorros en gas para toda la campaña, el tiempo de recupero de la inversión es de aproximadamente 2,8 campañas teniendo en cuenta tarifas internacionales de gas. Estos resultados permiten demostrar la factibilidad técnica y financiera del sistema propuesto en un contexto de tarifas no subsidiadas.

Palabras clave: curado de tabaco, eficiencia energética, energía solar.

INTRODUCCIÓN

En el contexto del desarrollo sostenible, es fundamental la integración de fuentes de energía renovables en la producción regional. La ONU subraya la necesidad de incrementar la participación de energías renovables y la planificación regional para mejorar la eficiencia energética mediante todas las tecnologías disponibles, al mismo tiempo que se fomente la innovación (United Nations, 2021). En este marco, la eficiencia energética en el secado del tabaco emerge como un área clave para la sostenibilidad ambiental y la viabilidad económica.

Los estudios muestran que el potencial de ahorro energético y reducción de emisiones en las empresas tabacaleras chinas es de 57,2 % y 68,1 %, respectivamente, con mayores oportunidades de optimización a través de la escala o mejora de procesos en lugar de solo mejoras tecnológicas (Wang y Yuan, 2020). Investigaciones previas han explorado hornos de secado energéticamente eficientes y fuentes alternativas de energía, como la solar, biomasa y tecnologías de bombas de calor, evidenciando una mayor eficiencia en el uso del calor y una reducción en el consumo de combustible comparado con los hornos convencionales (Fara et al., 1985; Naga Raju, 1989).

Actualmente, existe un creciente interés en la industria tabacalera local para reducir el consumo energético en el proceso de curado. Las estufas de tabaco de tipo bulk-curing comprenden el modelo de mayor difusión en el noroeste argentino (Altobelli et al., 2010). Destinadas a cumplir con el proceso de curado de tabaco Virginia (flue-cured), en su gran mayoría se encuentran abastecidas por gas natural. La estructura tradicional de las mismas está formada por una base de mampostería de ladrillo, y paredes y techos de doble chapa galvanizada, incluyendo aislación interna de lana de vidrio entre ambas. A su vez, se diferencian claramente dos secciones, una cámara de secado con abertura frontal, y el sector de quemador y turbinas, en una ubicación posterior denominada unidad de calor (Condorí et al., 2020).

Tradicionalmente se considera que una estufa convencional tiene un consumo de gas natural del orden de 1 m³ por cada kg de tabaco curado. Este valor puede verse ligeramente modificado en diferentes establecimientos y manejos particulares. En promedio la capacidad de carga de cada estufa de tabaco ronda los 10.000 kg de tabaco fresco, obteniéndose aproximadamente 1.000 kg de tabaco curado. Los estudios de auditoría energética locales mostraron que solo el 30% del gas natural y la electricidad suministrados se utilizaron de manera efectiva, con pérdidas térmicas debido a un aislamiento deficiente, puentes térmicos en la estructura y fugas de aire (Altobelli et al., 2011).

El presente trabajo tiene como objetivo exhibir los resultados obtenidos tras la implementación de un sistema de precalentamiento de aire en una estufa de curado de tabaco tipo bulk-curing, ubicada en dependencias de un productor tabacalero en la localidad de Vaqueros, provincia de Salta. Dicha intervención se enmarca en un convenio de asistencia entre el Fondo Especial del Tabaco (Secretaría de Agricultura de la Nación) y el Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional (INENCO). Desde fines del año 2022 se inició el diseño del mencionado sistema, el cual fue instalado durante fines del año siguiente. Dada la estacionalidad de la producción tabacalera, inicialmente sólo pudieron efectuarse ensayos en vacío (Altobelli, et al. 2023), los que ya permitieron estimar ahorros significativos en el consumo de gas natural. Los resultados aquí mostrados obedecen a ensayos realizados durante la campaña 2023-2024, ya con carga de hojas.

MATERIALES Y METODOLOGÍA

La Estufa convencional intervenida

Durante el año 2023 se trabajó en el diseño de un sistema de precalentamiento de aire híbrido (solar y con recuperación de calor residual) a ser instalado en el techo de una estufa de tabaco de tipo bulk-curing (Altobelli, et al. 2023). La estufa de tabaco intervenida cuenta con 4,67 m de ancho y 7,7 m de largo, con una altura máxima en la cumbre de 3,88 m (Figura 1). La estructura basal de la misma está constituida por mampostería de ladrillo con revestimiento de cemento. El resto de la construcción, paredes y techo, poseen sus caras con doble chapa galvanizada ondulada incluyendo aislamiento térmica de lana de vidrio entre ambas. En la parte posterior la estufa se encuentra la unidad de calor, conformada por el quemador de gas natural, al cual se anexa un intercambiador de calor de veinte tubos dispuestos en 5 filas, donde el humo circula por el interior y el aire por el exterior de los tubos. La salida de humos se lleva a cabo por dos chimeneas ubicadas arriba de la unidad de calor, que los vierten directamente al ambiente. El flujo de aire en la estufa es forzado mediante una turbina centrífuga de 4 kW ubicada en la parte inferior de la unidad de calor, debajo del quemador. Esta estufa posee 4 niveles para la carga de peines con hojas de tabaco. Por último, el suelo de la cámara de cemento se encuentra cubierto por un contrapiso de cemento.



Figura 1: Vista oeste de la estufa de tabaco y su unidad de calor, antes de ser intervenida. A la derecha vista de frente de la cámara con la carga de tabaco. Fuente: Altobelli, et al. 2023

La propuesta de intervención de la estufa incluyó dos aspectos:

1) Se colocaron en el techo de la estufa dos calentadores solares de aire, contruidos con caño estructural, chapa y cubierta de policarbonato alveolar de 6 mm de espesor, conformando un ducto que se conecta a la unidad de calor a nivel del techo. El aire ambiente se precalienta indirectamente con el humo de combustión, para lo cual se extienden las chimeneas por el interior de los calentadores, y por ganancia de radiación solar absorbida por los calentadores, durante el día.

2) Se colocó una envolvente de chapa, aislada térmicamente con lana de vidrio de 5 cm de espesor, en la parte superior de la unidad de calor para tomar el aire precalentado desde el colector-techo. A la unidad de calor ingresa aire precalentado por la ventana que antes tomaba aire ambiente. Se recupera el calor de salida de humo del quemador colocando una caja de distribución con dos caños rectangulares de 0,10 m x 0,2 m que vienen del intercambiador de calor, y sale con cuatro caños redondos de 7,5 x 10-2 m de diámetro. Estos caños continúan a lo largo y por el interior del colector solar, descargando el humo al ambiente a la altura de la puerta de carga de la estufa, como puede verse en las figuras 2 y 3. El aire que ingresa a la unidad de calor, para ser calentado por el quemador de gas, se encuentra a mayor temperatura que el aire ambiente produciendo ahorro de energía de acuerdo con la etapa de curado.

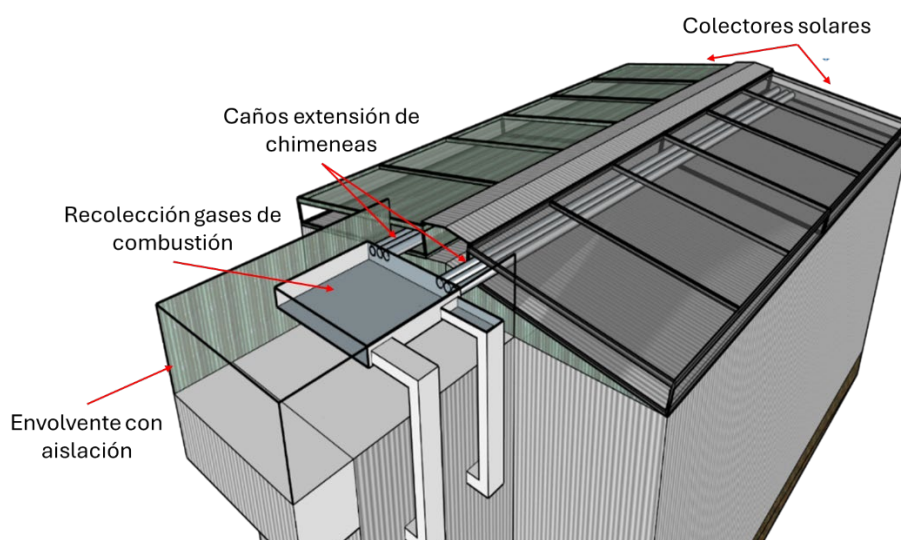


Figura 2: Esquema del sistema instalado. Se aprecia envolvente de la unidad de calor, salida de humo del quemador de gas y caja de distribución con salida por caños redondos

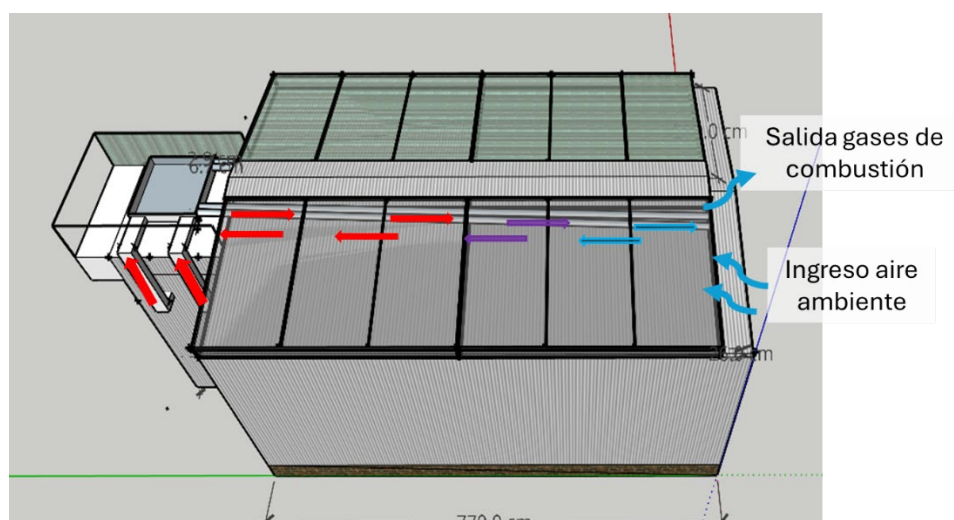


Figura 3: Detalle de circulación y dirección del aire en el sistema de precalentamiento (véase que el humo caliente proveniente de la combustión se enfría a medida que cede calor al aire ambiente que circula a contracorriente)

“Con estas modificaciones se recupera calor de la estufa las 24 horas de funcionamiento, y se aporta ganancia durante el día con energía térmica de la radiación solar. El aire que ingresa a la unidad de calor, para terminar de ser calentado por el quemador de gas, se encuentra a mayor temperatura que el ambiente produciendo ahorro de energía de acuerdo con la etapa de curado” (Altobelli et al., 2023).

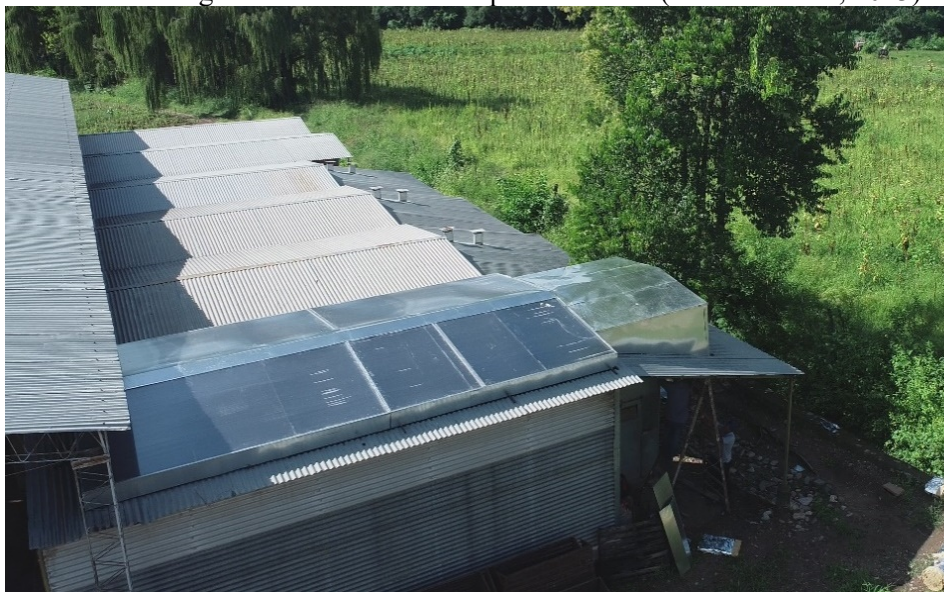


Figura 4: Fotografía aérea del sistema propuesto ya instalado en los techos de la estufa

Sistema de medición estufa intervenida y testigo

Durante la campaña de producción de tabaco 2023-2024 se procedió a medir el funcionamiento de la estufa intervenida con carga de tabaco y, de manera comparativa, de una estufa testigo. En búsqueda de reducir diferencias debido a aspectos meteorológicos y externos al funcionamiento y eficiencia de cada estufa, se trató de que las estufadas y sus registros fueran simultáneas. El sistema de medición estuvo compuesto por termocuplas tipo K, tipo E y sensores DHT22. Por su parte, los datos se registraron mediante un datalogger Campbell, y módulos Arduino. En lo que respecta a los datos de irradiación global fueron medidos mediante un solarímetro Kipp&Zonen instalado en el techo de la estufa intervenida.

En la Figura 5 se muestra un esquema de la ubicación de los sensores:

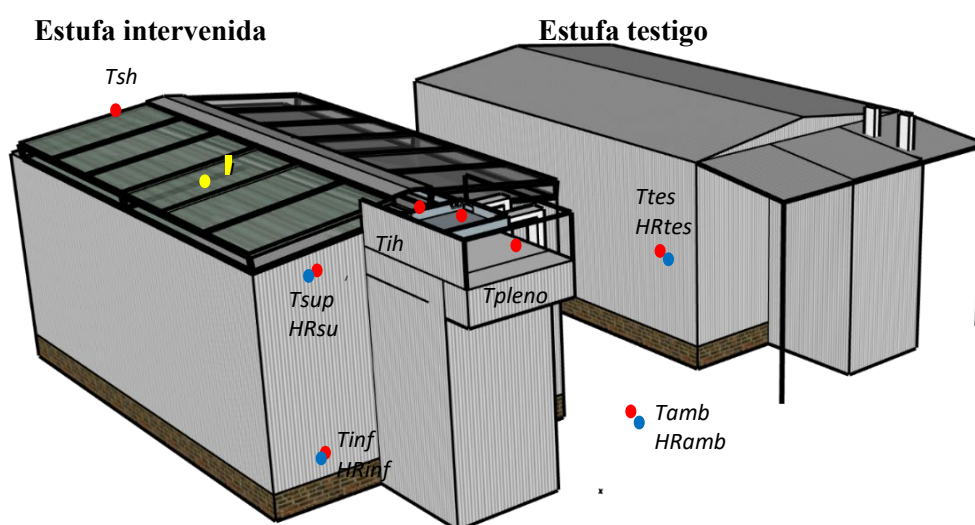


Figura 5: Esquema ubicación sensores en la estufa intervenida y su par testigo

- Temperatura ambiente (T_{amb})
- Temperatura estufa testigo (T_{tes})

- Humedad relativa estufa testigo (HRtes)
- Temperatura pleno (Tpleno)
- Temperatura salida de humo (Tsh)
- Temperatura ingreso de humo (Tih)
- Temperatura sector superior de la estufa (Tsup)
- Humedad relativa sector superior de la estufa (HRsup)
- Temperatura sector inferior de la estufa (Tinf)
- Humedad relativa sector inferior de la estufa (HRinf)
- Radiación global (I)

Por otro lado, se solicitó al productor las planillas de estufado, las cuales son diariamente completadas por su personal a cargo. En este caso los valores que se registran corresponden a las temperaturas obtenidas mediante un par psicrométrico (Temperatura de bulbo húmedo y temperatura de bulbo seco). Este registro sirvió para cotejar las mediciones realizadas con el resto de los sensores.

Cálculos de ahorro

Para determinar los ahorros logrados con el sistema propuesto, por la naturaleza y características del proceso de curado de tabaco, es necesario considerar de manera individual a la etapa inicial en la que predomina la recirculación de aire (Amarillamiento) de las etapas posteriores en la que se produce el secado de las hojas y las nervaduras.

Recirculación de calor

La primera etapa del curado de tabaco, llamada Amarillamiento, posee una duración de entre 24 – 36 horas. La misma es llevada a cabo con todas las ventanas de la estufa cerradas, recirculando el aire en su interior y llevando a las hojas a condiciones de humedad relativa cercanas a la saturación, con temperaturas no superiores a los 35 °C. Dicha recirculación es forzada mediante la turbina de la estufa (Figura 6).



Figura 6: Diagrama de circulación de aire en el interior de la estufa durante la etapa de amarillamiento

En la etapa de recirculación no se utiliza el aire proveniente de la unidad de calor, por lo que los ahorros se justifican por la disminución de las pérdidas térmicas, mayormente por el techo debido a la presencia del precalentador con mejor aislación térmica. La Ec. (1) fue utilizada para el cálculo del ahorro energético, la cual representa la relación entre las pérdidas del colector al ambiente frente a las pérdidas de la estufa al ambiente, considerando la temperatura del pleno superior de la estufa.

$$AE = \frac{T_{col} - T_{amb}}{T_{est_a} - T_{amb}} \quad (1)$$

Donde T_{col} es la temperatura media de los colectores, T_{amb} es la temperatura ambiente, y T_{est_a} es la temperatura de la estufa en el pleno superior.

Secado de lámina y nervadura

Luego que las hojas de tabaco llegaron al color adecuado durante el “amarillamiento” las etapas siguientes implican elevación de la temperatura siguiendo rampas ya definidas (Altobelli et al., 2013), e intercambio de aire con el ambiente. De esta manera se inicia el proceso de secado, donde las hojas van perdiendo humedad. En estas etapas el flujo de aire es nuevamente forzado por la turbina de la estufa y el aporte térmico proviene del quemador con una rampa de temperatura creciente hasta los 70 °C (Figura 7).

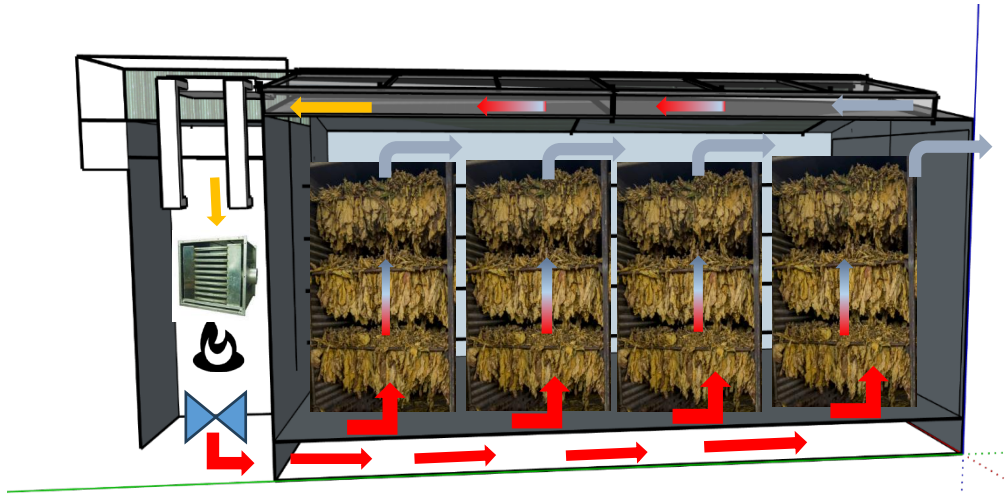


Figura 7: Diagrama de circulación de aire en el interior de la estufa durante las etapas de secado de lámina y de nervadura

Con la estufa mejorada, en la etapa de secado de láminas y nervaduras, no se toma el aire directamente del ambiente sino desde los calentadores de techo a través de la unidad de calentamiento. La temperatura de la estufa es cada vez más uniforme en la medida que se elimina el vapor de agua hacia el exterior. Para determinar el ahorro energético se utiliza la Ec. (2), la cual comprende la razón entre la diferencia de temperaturas entre la cámara de recuperación y el ambiente, dividido por la diferencia de temperaturas entre el interior de la estufa y el exterior.

$$AE = \frac{T_{rec} - T_{amb}}{T_{est} - T_{amb}} \quad (2)$$

Donde T_{rec} es la temperatura de recirculación desde los colectores de techo, T_{amb} es la temperatura ambiente, y T_{est} es la temperatura media de la estufa.

RESULTADOS OBTENIDOS

Mediciones de temperatura

Los resultados fueron obtenidos a partir del análisis y procesamiento de los valores de temperatura registrados en la campaña 2023-2024. En la Figura 8 se muestran los valores de temperatura registrados en la estufa intervenida durante un proceso de curado de ocho días. En la misma se muestra las temperaturas de la estufa en el pleno superior e inferior, la temperatura de salida de los colectores tomada por el quemador de gas y la temperatura ambiente. Los valores de la curva de temperatura correspondiente a la salida del colector siempre superan a la temperatura ambiente, siendo la diferencia entre ambas entre 20-30 °C. Si bien la temperatura de los colectores sigue el comportamiento de la temperatura ambiente, a su vez está influenciada por la radiación solar y por la mayor temperatura del

humos de salida del sistema de recuperación de calor, que se puede observar especialmente en los dos últimos días del proceso.

El ahorro energético se materializa por el menor requerimiento térmico del quemador de gas, controlado por el termostato, para alcanzar las temperaturas características de la estufa en cada etapa del curado de tabaco. Al iniciar el proceso, las temperaturas en la estufa son del orden de los 35 °C, no ingresa aire ambiente a la unidad de calentamiento, sino que el aire se recircula directamente desde el pleno superior de la estufa, calentándolo y retornando por el pleno inferior. En esta etapa, el requerimiento energético está relacionado principalmente a las pérdidas térmicas de la estufa, que son menores en el caso de la estufa mejorada por la mejor aislación térmica que proporciona tener los calentadores solares en el techo y en menor medida por el flujo de calor desde los colectores a la estufa por la diferencia de temperatura. El inicio de las etapas de secado se aprecia claramente porque se separan las temperaturas del pleno inferior y superior. La unidad de calentamiento toma el aire ahora desde los calentadores solares y se abren ventanas en el frente de la estufa para evacuar aire húmedo. La temperatura del pleno superior disminuye debido al efecto de enfriamiento por evaporación que produce el secado de las hojas. Hacia la última mitad del proceso ambas temperaturas tienden a ser iguales en la medida que se uniformiza el secado de las hojas de tabaco. La última etapa del curado se realiza a 70 °C de temperatura, para el secado de las nervaduras. Mientras las hojas ya están deshidratadas, la circulación de aire entre las mismas aumenta llevando a la homogenización de la temperatura.

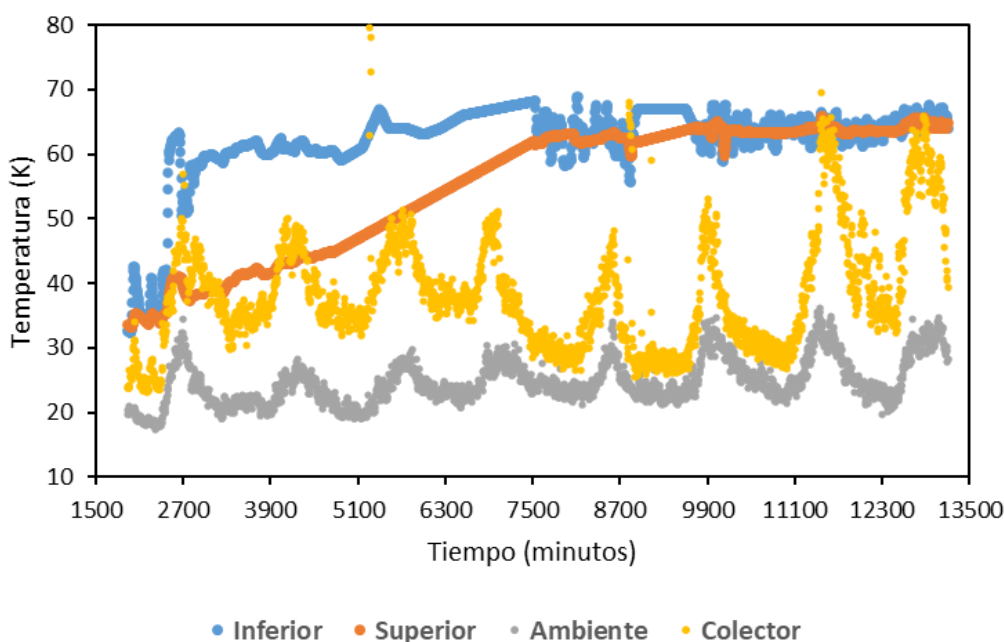


Figura 8: Temperaturas registradas en una estufada completa de la campaña 2023-2024

Ahorros estimados con el sistema propuesto

En la Figura 9 se muestra el ahorro energético producido en función del tiempo utilizando la Ec. (1) para la etapa de recirculación y la Ec. (2) para las etapas de secado. Los puntos de alta eficiencia, incluso cercanos a 1, corresponden a un desfase entre las respuestas temporales de los parámetros. También se muestra un ajuste lineal de los datos que tiene una muy suave pendiente negativa de $4E(-6)$ y una ordenada al origen de 0,42. En base a esta figura se puede afirmar que el sistema de precalentamiento del aire mediante el aprovechamiento del calor residual proveniente de los gases de combustión, y el soporte de calentamiento solar proporciona un ahorro energético y en el consumo de gas del orden del 40%, siendo esta una medida más bien ligeramente conservadora.

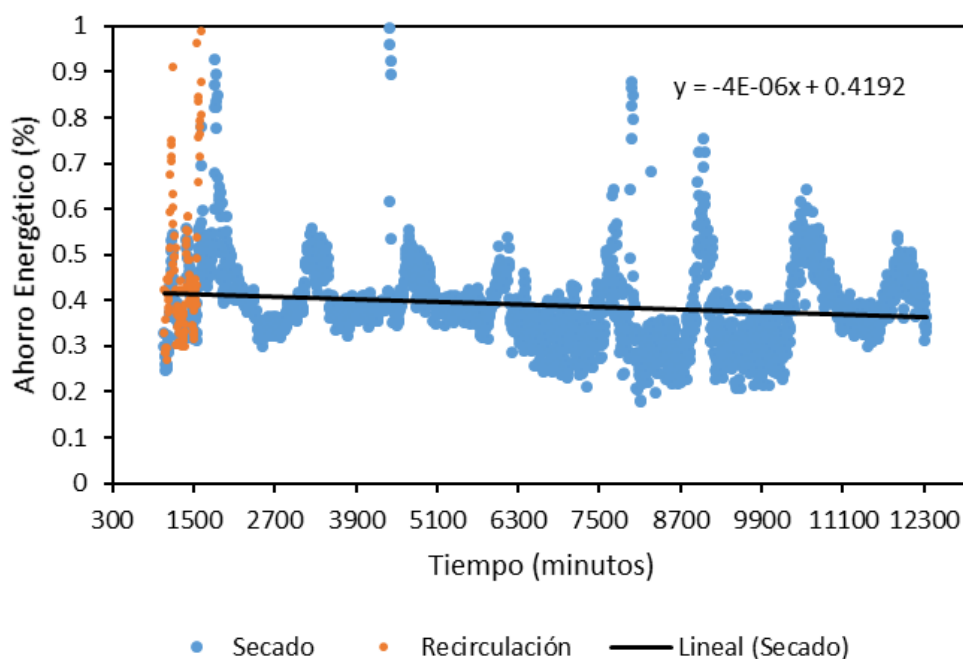


Figura 9: Ahorro calculado para la estufa intervenida

En el resultado que se muestra y en experiencias previas, se ha observado una reducción de los tiempos de curado. En este caso el proceso llevó aproximadamente 9 días frente a los 10 en promedio que se asume para las estufas convencionales. En términos técnicos esto implicaría una mejora desde el punto de vista del manejo logístico del emprendimiento, ya que se puede sumar una estufada (un curado de carga completa) extra por campaña.

Estudio Financiero

Los datos de costos de inversión se actualizaron mediante un relevamiento de los precios de mercado actuales, tanto de materiales como de la información disponible en cuanto a paritarias del rubro pertinente. Se estimó un aumento promedio del orden del 380 % con respecto a los valores del año anterior, y se consideró un cambio de USD 1 = \$884 según datos del Banco Nación Argentino con fecha 10/04/2024; esto lleva a un valor de inversión como se estipula en la Tabla 1.

Tabla 1. Insertar nombre de tabla y reordenar números de tabla

<i>Inversión</i>	<i>\$</i>	<i>USD</i>
<i>Materiales</i>	1944800	2200
<i>Mano de obra</i>	1591200	1800
<i>Total</i>	3536000	4000

Consumos energéticos

Para el caso del consumo de gas, se actualizaron los valores de las tarifas locales mediante la nueva Resolución N°114/2024.

Tabla 2: Datos de producción de tabaco y consumo de gas por estufa del emprendimiento

<i>Consumo energético gas estufada</i>	850	m ³
<i>Días de proceso</i>	12	
<i>Estufadas por campaña</i>	10	
<i>Nivel de producción (Tabaco curado) por campaña</i>	8500	kg
<i>Consumo energético de gas por campaña</i>	8500	m ³

Tabla 3: Datos tarifarios para categoría de consumo SGP P2

Categoría	SGP P2
Cargo fijo mensual	\$12729,95
Tarifa por m ³	\$115,12

Tabla 4: Datos de gastos por consumo de gas

Gastos por consumo energético gas	
Gasto por campaña	\$978520,00
Costo fijo por campaña	\$152759,40
Costo anual en gas	\$1131279,40
Costo anual en gas (USD)	USD 1279,73

Se realizaron dos tipos de análisis financieros. Por un lado, se estimó el tiempo de recupero de la inversión, a partir del ahorro logrado, con los valores actuales de las tarifas de gas (Fuente: GASNOR). Por otro lado, con el fin de referir los cálculos a valores comparables, se empleó la tarifa internacional de gas natural proveniente de la U.S. Energy Information Administration (www.iea.gov). Para el caso específico del gas natural se consideró la tarifa de consumidor final categoría comercial (USD/mil pies cúbicos), aplicado al promedio de los valores mensuales del último año (enero 2023 a enero 2024): USD10,65/mil pies cúbicos.

- Costo anual en gas a precio internacional: USD 3198,76

Ahorro estimado

Con las mejoras incorporadas a la estufa, se prevé un ahorro en el consumo de gas del orden del 40 %. Esto dado por el precalentamiento del aire que ingresa a la misma, debido a la recuperación del calor del humo de las tuberías del quemador y al aprovechamiento térmico de la radiación solar.

Tabla 5: Ahorros financieros estimados con la intervención propuesta

Ahorros en el consumo energético gas	
Ahorro por estufada	\$11846,77
Ahorro por campaña	\$129237,52
Ahorro por campaña (USD)	USD 442,77
Ahorro por campaña a precio internacional (USD)	USD 1407,45

Tiempo de recupero de la inversión

El tiempo de recupero de la inversión (TRI) es un indicador financiero utilizado para evaluar la rentabilidad de una inversión (Ec. (3)). El mismo se refiere al período de tiempo necesario para que los flujos de efectivo generados por una inversión igualen o superen el monto inicial de inversión realizado. En otras palabras, es el tiempo que se tarda en recuperar el dinero invertido a través de los ingresos generados por la inversión.

$$TRI = \frac{\text{Inversión inicial}}{\text{Flujos anuales}} \quad (3)$$

Considerando para el caso bajo estudio al ahorro como los beneficios generados por las mejoras de la estufa, y considerando el monto de la inversión requerida para lograr los mismos, surge que:

$$TRI = \frac{\text{USD 4000}}{\text{USD442,77}} = 9,03 \text{ campañas}$$

Con precio internacional del gas

$$TRI = \frac{USD\ 4000}{USD1407,45} = 2,84\ \text{campañas}$$

Cabe mencionarse que para los cálculos previos no se incorporó un ajuste por inflación ni por recategorización de consumidores en las tarifas de gas natural. Se entiende que, los tiempos de recupero de la inversión serían menores incluyendo en su cálculo los cambios en el cuadro tarifario argentino.

CONCLUSIONES

En este trabajo se ha evaluado un sistema innovador de precalentamiento de aire para estufas de curado "bulk curing", con el objetivo de mejorar la eficiencia energética y reducir el consumo de gas natural. Los resultados obtenidos confirman que el sistema propuesto cumple con estos objetivos, demostrando mejoras significativas en la eficiencia del proceso. El sistema propuesto permite mejorar la eficiencia energética de la estufa disminuyendo el consumo de gas natural, y reduciendo el tiempo de curado, respecto de las estufas convencionales. En la etapa de mayor temperatura del proceso de curado, 70 °C, la diferencia de temperatura correspondiente al ahorro es de 30 °C y disminuye para las etapas iniciales. El sistema mejorado fue ensayado, en vacío a fines de 2023 y con carga durante la campaña 2024. El mismo permitió mejorar la eficiencia energética de una estufa "bulk curing" disminuyendo el consumo de gas natural en un 40%. Se pudo calcular el ahorro energético a partir de balances térmicos y la medición de temperaturas. Es decir, sin intervenir la red de gas. La metodología para la determinación del ahorro energético se probó y verificó en la estufa tanto sin carga como con carga de hojas de tabaco, obteniendo valores similares.

El análisis financiero del sistema revela que el TRI es de aproximadamente 8 campañas bajo el precio actual del gas en Argentina. Sin embargo, si se consideran las tarifas internacionales de gas natural para usuarios finales de categoría comercial (a abril de 2024), el TRI se reduce considerablemente, a 2,8 campañas. Este cambio en el indicador económico destaca la viabilidad financiera del sistema en contextos de precios internacionales y refuerza su potencial para plantear su difusión y adopción regional. Estos valores se obtuvieron considerando únicamente los ahorros en gas natural, los mencionados indicadores mejoran de incluirse también los ahorros en electricidad y los cargos por impuestos.

REFERENCIAS

- Altobelli F., Condorí M., Durán G., Díaz Russo G. (2011). Determinación de pérdidas térmicas estructurales en estufas de tabaco tipo bulk-curing en la provincia de Salta. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 15, 07.47-07.53.
- Altobelli F., Vicente P., Díaz Russo G., Condorí M. (2013). Evaluación de sistemas de ahorro energético en estufas de curado de tabaco tipo bulk curing. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* Vol. 17, pp.07.37-07.44.
- Altobelli F., Condorí M., Durán G., Cruz I. (2023). Incorporación de un sistema de precalentamiento de aire en una Estufa de Curado de tabaco. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* Vol. 27, pp. 287 – 298.
- Bao Y., Wang Y. (2016) Thermal and Moisture Analysis for Tobacco Leaf Flue-curing with Heat Pump Technology. *Procedia Engineering*, 146, 481-493.
- Cao G., Bao Y., Wu, Ch., Wang, Y. (2017). Analysis on efficiency optimization of tobacco leaf flue-curing process. *Procedia Engineering*, 205, 540–547. 10.1016/j.proeng.2017.10.413.
- Cerquera Peña N., Ruiz Osorio Y., Pastrana Bonilla E. (2010) Evaluación del horno de curado de tabaco por convección forzada USCO-MADR. *Ingeniería e Investigación*, 30, 91-96.
- Condorí M., Albesa F., Altobelli F., Duran G., Sorrentino C. (2020). Image processing for monitoring of the cured tobacco process in a bulk-curing stove. *Computers and Electronics in Agriculture*, 168, 105-113. 10.1016/j.compag.2019.105113.
- Fara V. L., Grigorescu R., Marinescu P., Dogărescu V. (1985) Experimental results at a pilot solar station used for curing tobacco in a bulk-curing system — Economic implications. *Energy in Agriculture*, 4, 41-55

- Jun L., Juan W., Zhentao Z., Luwei Y., Zhaomin L., Qingmin Y. (2012) Experimental study on performance of heat pump system for tobacco leaf flue-curing. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(25): 63-67
- MINISTERIO DE HACIENDA, Presidencia de la Nación (2019). Informes de Cadenas de Valor. Tabaco, mayo 2019. ISSN 2525.0221.
- Naga Raju, J. (1989) An energy efficient drying chamber for FCV tobacco curing process. Solar & Wind Technology, 6, 159-163.
- Rodríguez Faraldo M. A. y Zilocchi H. O. (2012). Historia del cultivo de tabaco en Salta. Salta Capital: Ministerio de agricultura ganadería y pesca.
- United Nations (2021). The Sustainable Development Report 2021.
- Wang Q., Yuan Q. (2020). Energy-saving and emission reduction potential of the tobacco industry: A case study of China's 18 cigarette enterprises. Journal of Cleaner Production, 244, 118429.
- Zhao J., Wang R., Wangb M., Huang X. (2019). Application of Heat Pump Energy-Saving Flue-Cured Tobacco Technology. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 252, Issue 3.

ENERGY SAVINGS OF AN AIR PREHEATING SYSTEM IN BULK-CURING TOBACCO BARNs

ABSTRACT: This paper presents the results obtained from the intervention of a bulk-curing barn used for curing 8 tons of Virginia tobacco in Vaqueros, Salta, aimed at reducing energy consumption by incorporating solar energy and improving the thermal efficiency of the process. The intervention included installing an air preheating system on the barn roof, consisting of solar collectors and heat recovery from the burner's exhaust. Between 2022 and 2024, tests were conducted on the modified barn both in unloaded conditions and during tobacco leaf curing. The results show a gas consumption reduction of approximately 40% for a complete curing cycle with the incorporation of the proposed preheating system. Considering the necessary investment costs and gas savings for the entire curing season, the investment payback period is around 2.8 seasons, based on international gas rates. These results demonstrate the technical and financial feasibility of the proposed system in the context of unsubsidized tariffs.

Keywords: tobacco curing, energy efficiency, solar energy