

# Secado de bagazo en transporte neumático: beneficios operativos y ambientales

Federico J. Franck Colombres\*, Marcos A. Golato\*, Walter D. Morales\*, Carolina Cruz\* y Dora Paz\*\*

## Introducción

El proceso de combustión de la biomasa sigue en general dos etapas: la primera, de naturaleza física, que consiste en el mezclado, calentamiento, evaporación de la humedad y destilación ó volatilización y la segunda, de naturaleza química, caracterizada por la oxidación, en primer lugar, de los componentes volátiles y por último, del carbono fijo (Franck Colombres *et al.*, 2010; Oliva Merencio y Antolín Giraldo, 2011; Elías, 2005).

Entre las muchas variables interdependientes que afectan la eficiencia térmica del proceso en general, se pueden mencionar: temperaturas lo suficientemente altas como para facilitar las reacciones y evitar la formación de hollín, la turbulencia y el exceso de aire, adecuados para minimizar la combustión incompleta y las pérdidas de calor sensible. Se requiere además un tiempo de residencia suficiente para completar los diferentes procesos físicos y químicos.

En las cámaras de combustión de las calderas bagaceras, los fenómenos físicos (primera etapa) requieren un tiempo mayor que el fenómeno químico de oxidación. El contenido de humedad del bagazo, en muchos casos superior al 50%, modifica principalmente los tiempos requeridos por los mencionados fenómenos físicos.

La evaporación de la humedad del combustible alarga el periodo endotérmico de la combustión, lo que retarda la ignición. En algunos casos, esta evaporación se realiza a costa de la energía de las partículas encendidas, lo que hace que ellas se apaguen, dando lugar a la presencia de material incombusto en los gases de combustión. Por otro lado, el vapor que se libera crea un centro de presión local que impide la penetración del oxígeno, razón por la cual se requiere mayor cantidad de aire, lo que además de enfriar la cámara de combustión, resulta luego en pérdidas de calor sensible. El calor específico del vapor es mayor que el del aire y los gases de combustión; por ello, la presencia de vapor hace disminuir aún más la temperatura en la cámara de combustión.

En general en las calderas antiguas, cuando el

bagazo ingresa al hogar con un contenido de humedad mayor al 50%, es necesario agregar un combustible fósil adicional para lograr una combustión adecuada. Mediante el empleo de secadores, una parte de la humedad del bagazo se elimina obteniéndose un combustible presecado a la entrada del horno, lo que da lugar a una combustión más eficiente, con mayor tiempo de permanencia y bajo exceso de aire, que no requiere el empleo de combustibles adicionales (Magasiner and de Kock, 1987). La alternativa propuesta por la Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC) es utilizar secadores que empleen como gases secantes parte de los gases de combustión antes de su ingreso al calentador de aire (Aralde *et al.*, 1992).

El objetivo de este trabajo es mostrar los resultados más relevantes obtenidos con secadores de transporte neumático diseñados por la EEAOC, que funcionan satisfactoriamente en la Argentina, Panamá y México.

## Descripción del sistema de secado

El sistema de secado por transporte neumático desarrollado por la EEAOC consta generalmente de: un conducto de gases calientes (1); un tubo de secado vertical (2); una válvula rotativa de alimentación de bagazo húmedo (3); válvulas rotativas de descarga de bagazo presecado (una por cada boca de alimentación de la caldera) (4); ciclones separadores (5); un conducto de gases fríos (6) y válvulas de regulación de la pérdida de carga a la salida de cada ciclón (para controlar la distribución del bagazo presecado) (7) (Figura 1). Además, el sistema posee un ventilador de tiro inducido y una chimenea de gases del secador, no mostrados en la mencionada figura.

La Figura 2 muestra un secador en operación visto de frente; pueden apreciarse los ciclones con sus válvulas rotativas de descarga de bagazo presecado, el tubo de secado y la chimenea.

Estos secadores emplean gases de combustión como agente de secado y como medio de transporte del bagazo. Los gases de combustión de la caldera,

\*Ing. Mec., \*\*Dra. Ing. Qca., Sección Ingeniería y Proyectos Agroindustriales, EEAOC.

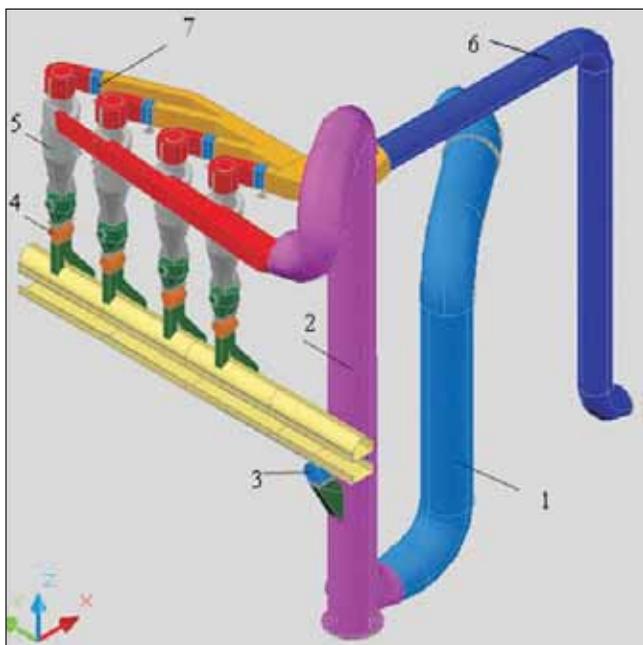


Figura 1. Esquema del sistema de secado diseñado por la Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombes.

luego de atravesar el haz convectivo, se dividen y se dirigen parte al precalentador de aire, siendo succionados por el ventilador de tiro inducido de la caldera, y el resto al secador de bagazo, al ser aspirados por el ventilador de tiro inducido del secador (Figura 3). El bagazo húmedo ingresa al tubo de secado por medio

de una válvula rotativa y es arrastrado en transporte neumático por los gases de combustión. A la salida del tubo de secado, se separa el bagazo presecado de los gases mediante ciclones dispuestos en paralelo, los cuales poseen en su base una válvula rotativa que descarga el bagazo presecado a las bocas de alimentación de la caldera.

### Evaluación de los sistemas de secado

Se evaluaron cinco de estos equipos instalados en calderas antiguas de bagazo, que se encuentran funcionando satisfactoriamente en la Argentina, Panamá y México. Estos secadores fueron amortizados en aproximadamente una zafra. El uso de estos dispositivos en calderas modernas es también ventajoso. No obstante, los beneficios son menores, ya que las calderas en cuestión poseen cámaras de combustión más altas, requieren un exceso de aire menor y tienen mayor aprovechamiento de calor (Cruz *et al.*, 2011).

### Metodología

La evaluación del desempeño de las calderas se realizó siguiendo la metodología propuesta por Golato *et al.* (2008), que consiste esencialmente en un conjunto de balances de masa y energía para la determinación de los flujos y eficiencias en el sistema, y que toma como datos de partida las mediciones de sus principales variables operativas. La cantidad de combustible consumido por la caldera se determina



Figura 2. Vista frontal del secador en operación. Ingenio El Carmen, México, 2010.

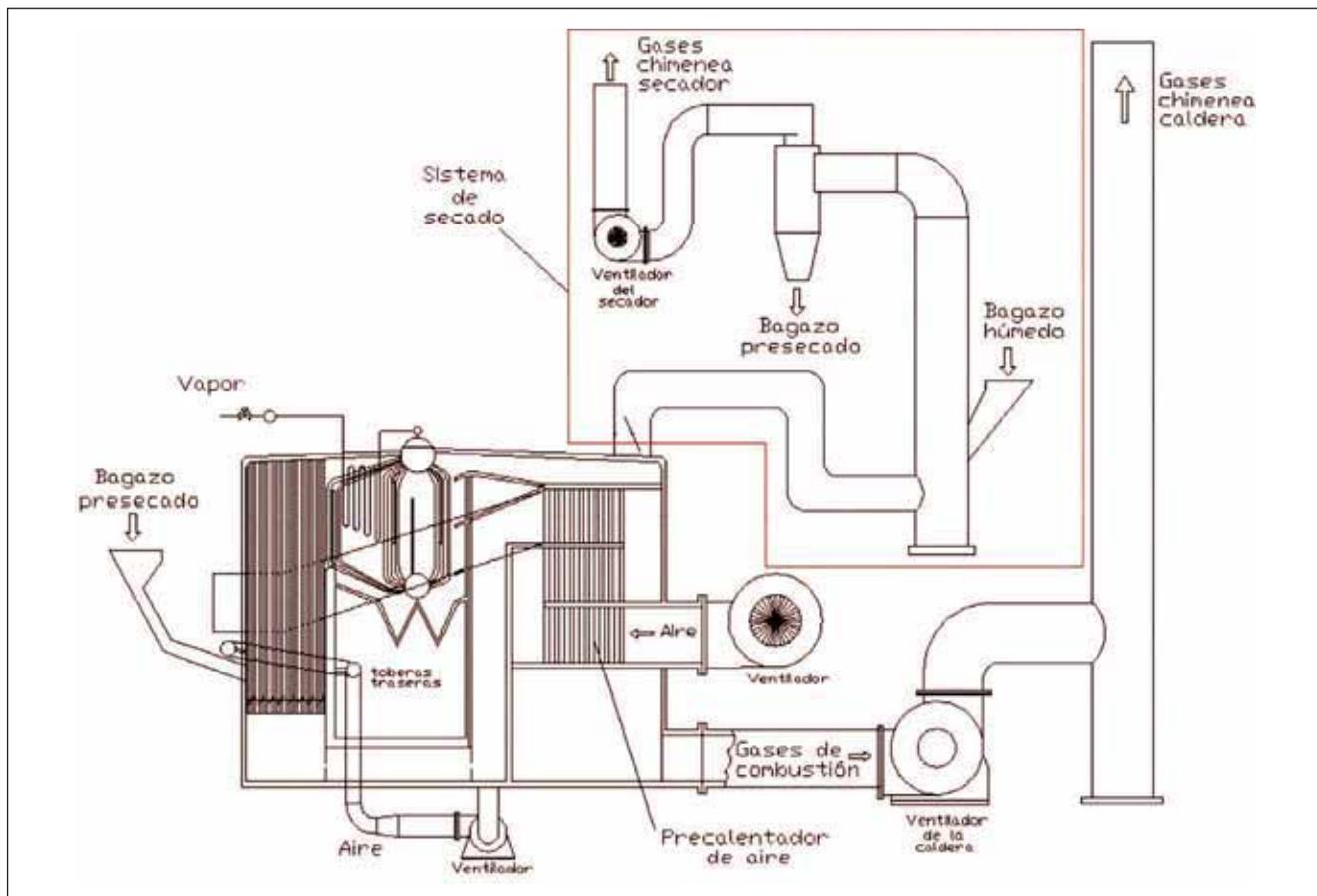


Figura 3. Esquema de un generador de vapor con secador.

mediante un balance de carbono, para lo cual se requiere el caudal de gases secos efluente, su composición y la composición elemental del combustible.

Para los cálculos se adoptó la composición elemental del bagazo propuesta por Hugot (1963), pero corregida en proporción a la cantidad promedio de cenizas presentes, determinadas experimentalmente en los ensayos de laboratorio.

Los datos en cada punto de medición se obtuvieron con instrumental portátil perteneciente al Laboratorio de Mediciones Industriales de la EEAOC, salvo las características del vapor vivo, que se tomaron de los instrumentos instalados en las plantas de calderas de los ingenios.

Los ensayos de medición se desarrollaron cuando los sistemas analizados se encontraban en condiciones estables de operación.

Se efectuaron seis lecturas de los parámetros evaluados durante las mediciones, completando un total de tres ensayos en cada caldera con el secador fuera de servicio y cinco ensayos en cada caldera con el secador en funcionamiento, con una duración de 40 minutos por ensayo aproximadamente.

Para determinar la concentración porcentual de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}$  y  $\text{NO}_2$  ( $\text{NO}_x = \text{NO} + \text{NO}_2$ ) en gases secos, se utilizó un analizador electrónico de gases de combustión marca TESTO, modelo 454, con rango de

0 a 25%vol y resolución de 0,1%vol para el  $\text{O}_2$  y rango de 0 a 10.000 ppm y resolución de 1 ppm para el  $\text{CO}$ , obteniéndose el  $\text{CO}_2$  por cálculo. Este instrumento determina, también por cálculo, el factor de dilución (1 + exceso de aire) en función del tipo de combustible seleccionado y mide la temperatura de los gases, con rango de -40 a 1200 °C (Golato *et al.*, 2005).

Las mediciones de emisión de material particulado efluente por chimenea se efectuaron con un equipo de muestreo de partículas isocinético, marca Environmental Supply Co., modelo C-5000. El mencionado muestreo de partículas se realizó según el método N° 5 propuesto por la Agencia de Protección del Medioambiente de los Estados Unidos de Norteamérica (USEPA, 1970).

La humedad del bagazo se determinó por desecación en estufa a 105°C, hasta obtener peso constante.

Los valores del contenido de cenizas se obtuvieron por incineración total en mufla computarizada a 550°C.

El poder calorífico inferior (PCI) se calculó en base a la composición elemental del bagazo y su poder calorífico superior. Este último se determinó utilizando una bomba calorimétrica automática marca IKA, Modelo C 5012, trabajando en método adiabático (Castagnaro *et al.*, 2011).

Se realizó una comparación entre el consumo energético de una caldera con el secador fuera de servicio y en operación. Dado que con el secador en servicio se obtuvo una mayor cantidad de vapor que con el sistema sin secador, se determinó, en base al índice de generación, el caudal de bagazo que se consumiría en este último caso, para obtener la misma cantidad de vapor que produjo el sistema con secador. Las variables específicas se mantuvieron iguales. En cada caso, se calculó la energía consumida a partir del poder calorífico inferior.

Se tabuló el rango de las mejoras en lo referente a ahorro y humedad de bagazo, exceso de aire, PCI, rendimiento energético, índice de generación y emisión de material particulado. Se da el promedio de las concentraciones de CO, NOx y material particulado de las emisiones medidas durante los ensayos.

## Resultados

En la Tabla 1 se presentan algunos valores operativos de una caldera funcionando con y sin secador de bagazo.

En la mencionada tabla se observa una eficiencia del 60,4% y 73,6% para la caldera sin y con secador de bagazo, lo cual representa un aumento del 22% aproximadamente para el segundo caso.

Puede observarse también que la caldera operando con secador produjo más vapor que operando sin él. En la Tabla 2 se presenta una comparación para igual cantidad de vapor producido.

El ahorro de energía con el secador en operación es de 45 MJ/h o 17,7%, respecto a la caldera sin secador. El ahorro de bagazo sería también 17,7% si se expresaran los 45 MJ/h en bagazo equivalente, tomando las mismas condiciones del bagazo original.

En la Tabla 3 se muestran algunas de las mejoras que se obtienen con el funcionamiento de calderas antiguas de baja presión (18-22 bar) con adición de estos secadores, en comparación al funcionamiento sin secador, para la misma producción de vapor.

Se observan importantes mejoras en el rendimiento energético del sistema caldera-secador cuando se trata de una caldera antigua, producto fundamentalmente del significativo descenso del contenido de humedad del bagazo y del menor requerimiento de aire de combustión. El secador de bagazo permite que la mayor parte del trabajo de evaporación de la humedad se realice fuera del horno, lo que permite ampliar su capacidad.

**Tabla 1. Valores operativos de una caldera con y sin el secador en operación.**

	Unidades	Sin secador	Con secador
Vapor	kg/h	32.547	58.400
Bagazo húmedo consumido	kg/h	20.340	28.598
Eficiencia del sistema	%	60,40	73,60
Índice de generación	kg vapor/kg de bagazo	1,60	2
Factor de dilución	-	1,51	1,68
Concentración de CO en gases efluentes	%	0,0057	0,0029
Humedad del bagazo húmedo	%	52	50
PCI bagazo húmedo	kJ/kg	7034	7390
Humedad del bagazo presecado	%	-	30,40
PCI bagazo presecado	kJ/kg	-	11.262
Energía consumida	MJ/h	143	211

**Tabla 2. Comparación de una caldera con y sin el secador en operación, produciendo la misma cantidad de vapor.**

	Unidades	Sin secador	Con secador
Vapor	kg/h	58.400	58.400
Bagazo húmedo consumido	kg/h	36.497	28.598
Eficiencia de la caldera	%	60,40	73,60
Índice de generación	kg vapor/kg de bagazo	1,60	2
PCI bagazo húmedo	kJ/kg	7.034	7.390
Energía consumida	MJ/h	257	211
Ahorro de energía	MJ/h	-	45
Ahorro porcentual	%	-	17,70

**Tabla 3. Mejoras relativas obtenidas con el empleo del secador.**

	Mejoras (%)
Bagazo sobrante	12-18
Disminución del exceso de aire	20-40
Disminución de la humedad del bagazo	15-40
Disminución de gases efluentes	9-17
Aumento del PCI del bagazo quemado	26-54
Aumento del rendimiento energético del sistema	14-22
Índice de generación [kg vapor/kg bagazo]	14-22
Disminución del material particulado emitido	75-85

En calderas bagaceras modernas de alta presión (42-80 bar), de hornos sustancialmente más altos y que operan con menores excesos de aire, que alcanzan eficiencias del orden de 80% a 85%, el acople de un secador de bagazo permite presecar el bagazo en aproximadamente 11 puntos de humedad, con un beneficio en el rendimiento estimado en 14% aproximadamente (Cruz *et al.*, 2011).

La Tabla 4 muestra algunas de las mejoras del impacto ambiental de calderas con secadores diseñados por la EEAOC. Los valores representan promedios entre las chimeneas de la caldera y del secador.

Se observa que en todos los casos estudiados se obtienen mejoras importantes en las emisiones: en promedio, la concentración de CO disminuye aproximadamente un 89%, la de NOx un 22% y el material particulado un 79%. Además, con una reducción de los gases efluentes de entre 9% y 17%, la reducción de las emisiones en valores absolutos es aún mayor. La reducción del CO se debe a la menor humedad del bagazo, lo cual permite una mejor combustión. Por la misma razón, y debido a los ciclones, el material particulado es menor. La disminución de las emisiones de NOx probablemente se deba al menor requerimiento de aire.

**Tabla 4. Concentración de CO, NOx y material particulado, con y sin secador en funcionamiento.**

			Panamá		México	Argentina	
			Ingenio 1	Ingenio 2	Ingenio 1	Ingenio 1	Ingenio 2
CO	Sin secador	ppm	2.002	1.709	390	3.095	3.295
	Con secador	ppm	209	212	48	220	361
	Disminución	%	89,6	87,6	87,7	92,9	89,0
Nox	Sin secador	ppm	154	S/D	S/D	133	125
	Con secador	ppm	135	S/D	S/D	91	98
	Disminución	%	12,3	S/D	S/D	31,6	21,6
Material particulado total	Sin secador	mg/Nm <sup>3</sup>	S/D	S/D	S/D	3.572	2.631
	Con secador	mg/Nm <sup>3</sup>	S/D	S/D	S/D	855	471
	Disminución	%	S/D	S/D	S/D	76,1	82,1

S/D: sin datos.

## Consideraciones finales

Los secadores de bagazo acoplados a calderas antiguas permiten mejoras en la eficiencia térmica del 14% al 22%. Esto se debe principalmente a la reducción de la humedad del bagazo entre un 15% y 40% y a la reducción del requerimiento de aire entre un 10% y 20%. El sistema caldera-secador produce entre 14% y 22% más de vapor que la caldera original, con la misma cantidad de bagazo húmedo.

Al mismo tiempo, con la operación de los secadores se logran importantes reducciones en las emisiones: en la experiencia descrita en este trabajo, la concentración de CO se redujo, en promedio, un 89%, el NOx un 22% y el material particulado, 79%.

Está claro que la tecnología de secado de bagazo por transporte neumático permite lograr una mayor producción de vapor empleando la misma cantidad de biomasa, sin el aporte de combustibles de origen fósil y con disminución de las emisiones. Estos aspectos hacen de esta una tecnología de producción más limpia, que ahorra recursos y reduce el impacto ambiental.

## Agradecimiento

Los autores agradecen a la Agencia de Cooperación Internacional de Japón (JICA), por su apoyo a los programas para el desarrollo de las tecnologías de producción limpia.

## Bibliografía citada

- Aralde, L. E.; D. Paz de Vázquez y G. J. Cárdenas. 1992.** Metodología de cálculo de un secadero de bagazo en transporte neumático. *Rev. Ind. Agríc. de Tucumán* 69 (1-2): 71-79.
- Castagnaro, A.; M. A. Golato; D. Paz y E. A. Feijóo. 2011.** Caracterización energética de biomásas residuales de origen agroindustrial de Tucumán. *Avance Agroind.* 32 (2): 32-37.
- Cruz, C.; F. J. Franck Colombres; W. D. Morales; M. A. Golato y D. Paz. 2011.** Secado de bagazo en calderas de alta presión. En: *Resúmenes de la*

Reunión Técnica Nacional de la Caña de Azúcar, 17, Orán, Salta, R. Argentina, pp. 201-204.

**Elías, X. 2005.** La combustión. Factores endógenos y exógenos. En: Elías Castells, X. (ed.), Tratamiento y valoración energética de residuos, Díaz de Santos, Madrid, España, pp. 149-216.

**Franck Colombres, F. J.; M. A. Golato; W. D. Morales; G. Aso y D. Paz. 2010.** Monitoreo de un sistema de secado de bagazo acoplado a una caldera en un ingenio de México. Rev. Ind. Agríc. de Tucumán 87 (2):33-44.

**Golato, M. A.; G. Aso; D. Paz y G. J. Cárdenas. 2005.** Inyección de aire secundario caliente en calderas de vapor bagaceras y su influencia en el rendimiento térmico. Rev. Ind. Agríc. de Tucumán 82 (1-2): 17-25.

**Golato, M. A.; F. J. Franck Colombres; G. Aso; C. A. Correa y D. Paz. 2008.** Metodología de cálculo de

la eficiencia térmica de generadores de vapor. Rev. Ind. Agríc. de Tucumán 85 (2): 17-31.

**Hugot, E. 1963.** Manual para ingenieros azucareros. Cia Editorial Continental, DF, México.

**Magasiner, N. and J. W. de Kock. 1987.** Design criteria for fibrous fuel fired boilers. Energy World, Aug./Sep.: 4-12.

**Oliva Merencio, D. y G. Antolín Giraldo. 2011.** Aproximación experimental a la combustión del bagazo de caña en lecho fluidizado. [En línea]. Disponible en [www.cubasolar.cu/biblioteca/Ecosolar/Ecosolar03/HTML/articulo03.htm](http://www.cubasolar.cu/biblioteca/Ecosolar/Ecosolar03/HTML/articulo03.htm) (consultado 15 agosto 2011).

**United States Environmental protection Agency (USEPA). 1970.** Determination of particulate matter emissions from stationary sources. 1: 371-442. [En línea]. Disponible en [www.epa.gov/ttn/emc/promgate/m-05.pdf](http://www.epa.gov/ttn/emc/promgate/m-05.pdf) (consultado 15 abril 2008).

**BELT**

Liberá el nuevo poder para el control de orugas.

**BELT.**  
El único genio que te concede 4 deseos.

- 1- Menor costo por persistencia única hasta 30 días.
- 2- Inmediata detención del daño 2 a 3 hs. posteriores a la aplicación.
- 3- Máxima flexibilidad para controlar todas las orugas y tamaños.
- 4- Excelente perfil ambiental. Baja toxicidad y respeto a benéficos.

INGRESÁ A [WWW.BELT.BAYER.COM.AR](http://WWW.BELT.BAYER.COM.AR) Y CONOCÉ ESTE NUEVO PODER

Bayer CropScience  
www.bayercropscience.com.ar

TUCAGRO S.R.L.  
Red de Servicios DORADOS

PELIGRO. SU USO INCORRECTO PUEDE PROVOCAR DAÑOS A LA SALUD Y AL AMBIENTE. LEA ATENTAMENTE LA ETIQUETA.