

Combustión de vinaza con materiales celulósicos en calderas bagaceras de ingenios de la provincia de Tucumán (R. Argentina)

Federico J. Franck Colombres*, Marcos A. Golato*, Enrique Feijóo*, Walter D. Morales*, Dora Paz* y Mario Octaviano**

RESUMEN

Se realizó un análisis teórico preliminar para determinar la cantidad y concentración de vinaza necesaria para producir, en una caldera tipo de la industria azucarera de Tucumán, la misma cantidad de vapor que produce dicha caldera funcionando únicamente con bagazo. Se consideró, como combustible, la mezcla de vinaza con residuo agrícola de cosecha (RAC o maloja) y bagazo para calderas que funcionen sin secador de bagazo o con él. El estudio teórico mostró que se podrían emplear diferentes proporciones de mezclas de vinaza cruda o concentrada, RAC y bagazo húmedo o presecado en calderas bagaceras. Con ello, además del beneficio de la disposición de la vinaza, se obtendrían, en algunos casos, importantes ahorros de bagazo. Luego se realizaron ensayos preliminares de combustión de una mezcla de bagazo presecado, RAC y vinaza cruda, de 11°Bx, en una caldera bagacera convencional con secador de bagazo. Para una relación del 75,7% de bagazo húmedo, 13,6% de RAC y 10,7% de vinaza se obtuvo una combustión estable, lográndose un ahorro de bagazo del 21,1% con respecto al bagazo consumido por la misma caldera operando únicamente con bagazo húmedo y sin secador de bagazo, y se empleó un 28,4% de vinaza en relación a la vinaza producida en la destilería.

Palabras clave: residuos agrícolas, energía, biomasa, biocombustibles, vapor, efluentes.

ABSTRACT

Combustion of vinasse with cellulosic materials in bagasse boilers

A preliminary theoretical analysis was made to determine the amount and concentration of vinasse that a bagasse boiler (of the same type as conventionally used in the sugar industry in Tucumán) would require to produce the same amount of steam as that generated by a boiler run on bagasse only. As fuel, vinasse burnt in combination with crop harvest residues (RAC) and bagasse was considered, both in cases where the boiler worked without a bagasse dryer or with it. This theoretical study showed that mixtures with different proportions of raw or concentrated vinasse, RAC and wet or pre-dried bagasse could be employed in bagasse boilers, with the benefits of vinasse disposal and saving significant bagasse amounts. Furthermore, a mixture of 11° Bx vinasse, pre-dried bagasse and RAC was tested preliminarily by burning in a conventional bagasse boiler with a bagasse dryer. Stable combustion was achieved with a ratio of 75% wet bagasse, 14% RAC and 11% vinasse, and a 25% bagasse saving was attained over a boiler lacking a bagasse dryer and running only on wet bagasse. Moreover, a 28% of vinasse produced by the distillery was used.

Key words: crop residues, energy, biomass, biofuels, steam, effluents.

* Sección Ingeniería y Proyectos Agroindustriales, EEAOC. ingenieria@eeaac.org.ar

** Ingenio Santa Bárbara.

INTRODUCCIÓN

Como consecuencia de su alta carga orgánica y su elevado contenido de sales, las vinazas que se generan como efluentes en la operación de destilerías de alcohol de melaza son consideradas pasivos ambientales que deben ser resueltos hacia una operación sustentable del sector.

Se producen entre 10 y 14 litros de vinaza por litro de alcohol 96° (Goyes y Bolaños, 2005), con una demanda química de oxígeno (DQO) y una demanda bioquímica de oxígeno (DBO) de alrededor de 100.000 mg/l y 40.000 mg/l respectivamente, lo que impide su descarga en los cauces naturales. Además de su alta carga orgánica, la vinaza posee un elevado contenido de sales inorgánicas, por lo que solo puede utilizarse en fertirrigación en forma limitada en la provincia de Tucumán, República Argentina, debido a la posibilidad de que los suelos se salinicen (Fadda y Morandini, 2007).

Existen diferentes propuestas para tratar y darle uso a la vinaza (Morandini y Quaia, 2013), tales como la producción de biogas en biodigestores, la preparación de compostaje, la fertirrigación, la concentración y posterior combustión de vinaza en calderas especiales (ISGEC, 2013) y la combustión de vinaza con médula presecada en calderas convencionales (López Hernández, 1991), pero generalmente estos procesos requieren una inversión importante o tienen un costo operativo elevado.

La vinaza, a pesar de su concentración de materia orgánica, posee un elevado contenido de agua, lo cual lleva a que su poder calorífico sea bajo y su combustión resulte difícil de realizar. Para lograrla es necesario concentrar la vinaza, usar un combustible adicional o combinar ambas opciones.

El objetivo del presente trabajo es presentar los resultados de un estudio teórico preliminar para determinar la cantidad y concentración de vinaza posible de quemar, en conjunto con bagazo y residuos agrícolas de la cosecha en verde de caña de azúcar (RAC) en calderas bagaceras convencionales de la Industria azucarera de Tucumán, y mostrar los resultados de los ensayos experimentales efectuados en una caldera empleando como combustible una mezcla de bagazo presecado, RAC y vinaza cruda.

MATERIALES Y MÉTODOS

Cálculos teóricos

Se considera que un ingenio tipo de Tucumán produce 110 kg de azúcar, 300 kg de bagazo, 12 l de alcohol y 130 l de vinaza cruda de aproximadamente 11°Bx por tonelada de caña molida (TC). Se estiman para Tucumán una producción promedio de RAC potencial seco de aproximadamente 150 kg/TC (Casen *et al.*, 2011) y un porcentaje de recolección del 50%, con lo que la producción de RAC presecado a campo hasta una

humedad del 15% (b.h) sería de 88 kg/TC; es decir un 29% con respecto al bagazo (para este estudio se asume un valor conservador del 25%).

Siguiendo la metodología propuesta por Golato *et al.* (2008), se realizaron tres ensayos en una caldera tipo de un ingenio de Tucumán y se determinaron sus variables características: caudales, temperaturas, presiones, rendimientos, coeficientes globales de transferencia de calor, etc., asumiendo la situación de combustión completa.

A partir del flujo de bagazo consumido por la caldera, se determinaron la cantidad de caña molida correspondiente a dicho bagazo y las correspondientes cantidades de vinaza y RAC en relación a esta.

Se hizo un análisis teórico preliminar para determinar la cantidad y concentración de vinaza necesaria para producir, en la caldera ensayada, la misma cantidad de vapor que produce dicha caldera funcionando únicamente con bagazo húmedo. Se consideró que la vinaza puede emplearse en los siguientes estados: cruda, a 11°Bx (vinaza 11), tal como sale actualmente de las destilerías (de calentamiento directo); a 14,3°Bx y 14,7°Bx (vinaza 14), con calentamiento indirecto en destilería y con un sistema de calentamiento-flasheo, respectivamente; a 17,9°Bx (vinaza 18), combinando las dos mejoras anteriores, y a mayores concentraciones, incorporando evaporadores de múltiple efecto. Además se consideró la incorporación del RAC correspondiente y la incorporación de un secador de bagazo. Para los cálculos se utilizó la metodología propuesta por Aralde *et al.* (1992) adaptada para contemplar la combustión de la mezcla combustible propuesta en cada caso.

A partir de los resultados del análisis teórico se seleccionaron algunas alternativas para ser ensayadas, teniendo en cuenta que:

- la cantidad de vinaza a emplear sea la mayor posible
- la humedad del combustible mezcla que ingresa al horno sea menor a la del bagazo húmedo
- la cantidad de cenizas producidas sea tal que su frecuencia de limpieza sea como máximo el doble de la actual
- la temperatura de combustión sea menor a la temperatura de ablandamiento de las cenizas
- la cantidad de combustible que ingresa al horno sea menor o igual a la actual

Ensayos experimentales

A partir de los resultados del análisis teórico se realizaron tres ensayos adicionales de combustión para la alternativa de combustión de una mezcla de bagazo presecado, RAC y vinaza cruda en una caldera bagacera convencional. Previamente, se realizó un relevamiento de las instalaciones y se estudió la forma de alimentar el RAC y la vinaza, así como también su mezcla con el bagazo

presecado. Para poder evaluar las mejoras, primero se ensayó la caldera funcionando únicamente con bagazo presecado y luego se efectuaron ensayos con la adición del RAC y la vinaza.

Los ensayos se realizaron siguiendo la metodología propuesta por Golato *et al.* (2008).

Para poder realizar los ensayos en fábrica se adecuaron las instalaciones de transporte de combustible a la caldera de vapor. En la Figura 1 se muestra un esquema con la caldera y el sistema de distribución de bagazo del ingenio donde se realizaron los ensayos, con las modificaciones para la alimentación y mezclado de

vinaza y RAC enmarcadas en trazos. La vinaza se impulsó con una bomba centrífuga a través de 200 m de cañería hacia las boquillas de aspersión instaladas en un mezclador, para ser pulverizada sobre el RAC previamente acondicionado (presecado en campo y picado) que se alimentó con una pala cargadora en el mezclador. El mezclado se produjo en una rastra que transportaba el material.

Los ensayos en el generador de vapor, en cada caso, se llevaron a cabo durante aproximadamente cuatro horas, previendo que los sistemas se encuentren en condiciones estables de operación.

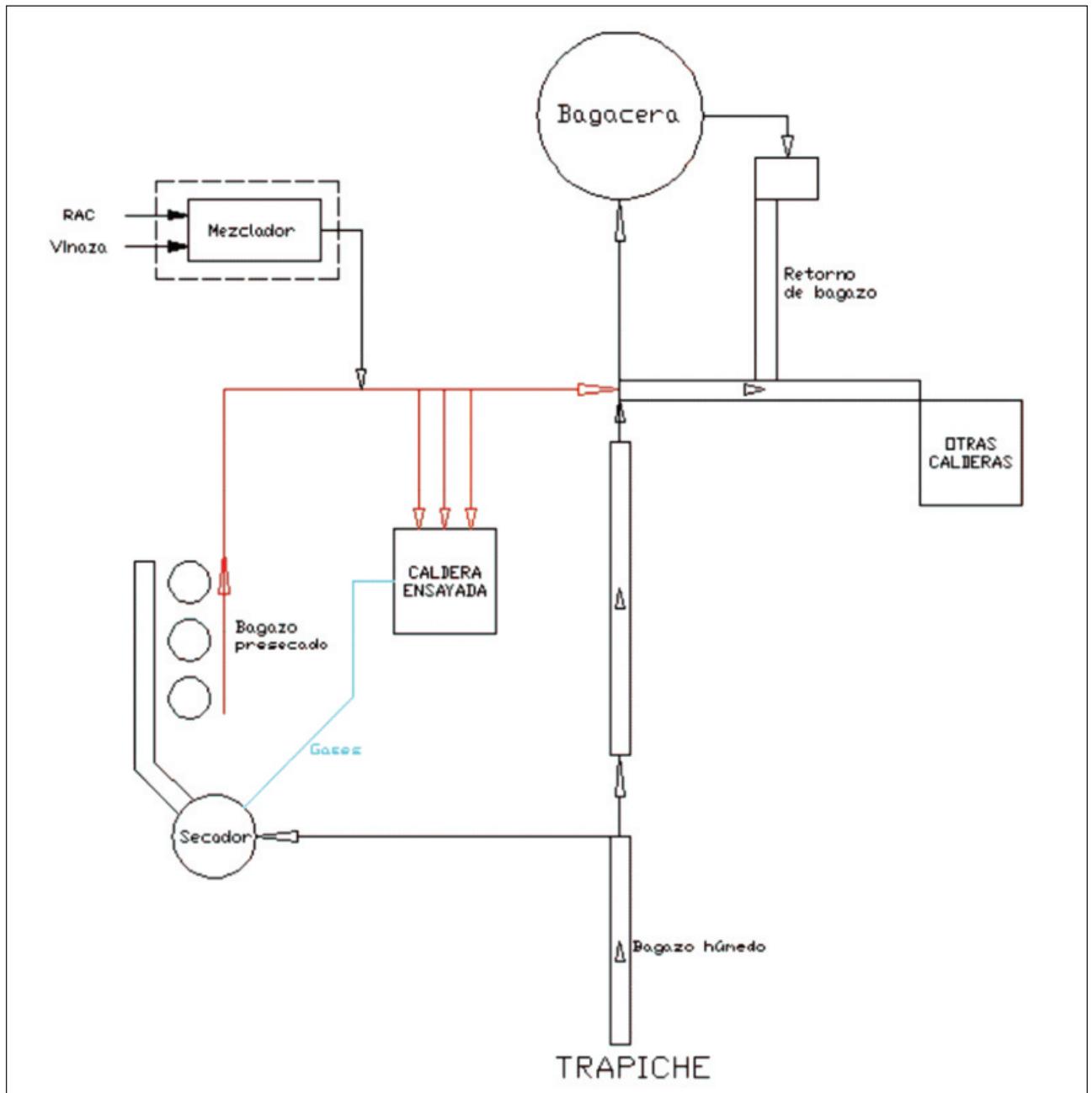


Figura 1. Esquema del sistema de distribución de bagazo, RAC y vinaza.

Se realizó una comparación entre los valores históricos de las variables de operación de la caldera funcionando con secador, y los valores obtenidos durante los ensayos experimentales de combustión de bagazo presecado y de combustión de la mezcla de bagazo presecado con RAC y vinaza cruda de 11°Bx.

Características de los sistemas ensayados

La caldera considerada para este estudio fue una caldera convencional de la industria azucarera de Tucumán, del tipo acuotubular de dos domos, marca Babcock & Wilcox modificada, de producción nominal original de 40 t/h, presión de diseño de 21 kg/cm² ef y temperatura de 320°C. La caldera poseía un calentador de aire (ICQ), una grilla del tipo volcable, un secador de bagazo en transporte neumático y un filtro de lavado húmedo de gases ("scrubber"). Los gases a la salida del haz convectivo, cuando la caldera funcionaba con el secador de bagazo, se dividían en dos corrientes (Figura 2): Corriente 1 y Corriente 2. La Corriente 1 ingresaba al ICQ para calentar el aire que iba a la grilla previamente introducido por un ventilador de tiro forzado (VTF) y, al abandonarlo, fluía hacia la chimenea de la caldera, inducida por un ventilador de tiro inducido (VTI), a través de un filtro húmedo "scrubber", donde los gases finales eran lavados para separar las partículas que los acompañaban. La Corriente 2 se dirigía al secador de bagazo, donde se encontraba con el bagazo húmedo que era fluidizado y transportado a lo largo de este conducto de secado, alcanzando la humedad final de diseño en su parte superior. A partir de allí, la mezcla de gases, vapor de agua y bagazo era conducida a un multiciclón donde se separaba el bagazo presecado de la corriente gaseosa, la

cual era inducida a circular por medio de un ventilador auxiliar hacia la chimenea del secador.

Los ensayos se realizaron a escala industrial para las condiciones operativas de la fábrica al momento de los ensayos y con los equipos en las condiciones de regulación en las que se encontraban. Los ensayos necesarios para el estudio teórico preliminar (quemando únicamente bagazo húmedo) se realizaron a principios de zafra, con la caldera recién reparada y funcionando con carga parcial. Los ensayos con la mezcla combustible de bagazo presecado, RAC secado a campo y vinaza cruda se realizaron a fines de zafra, operando la caldera con importantes infiltraciones de aire y evidenciando esta una falta de mantenimiento y regulación.

Determinaciones analíticas

La humedad de la vinaza cruda, del RAC y del bagazo se determinaron por desecación en estufa hasta peso constante a 105°C para el bagazo y el RAC, y a 54°C para la vinaza, debido a que esta se emulsionaba a mayores temperaturas. De los sólidos obtenidos en cada caso se determinaron el contenido de cenizas por incineración total en mufla a 550°C y el poder calorífico superior (PCS), utilizando una bomba calorimétrica automática marca IKA, Modelo C 5012 y trabajando en método adiabático (Castagnaro *et al.*, 2011).

La composición (contenido de carbono, hidrógeno, oxígeno, cenizas y humedad) del combustible resultante en cada caso (estudio teórico y ensayos) se determinó a partir de la composición en base seca y libre de cenizas de cada combustible, corregida en base al contenido de cenizas y humedad obtenido de los ensayos de laboratorio. Dicha composición seca sin cenizas se obtuvo, para el bagazo,

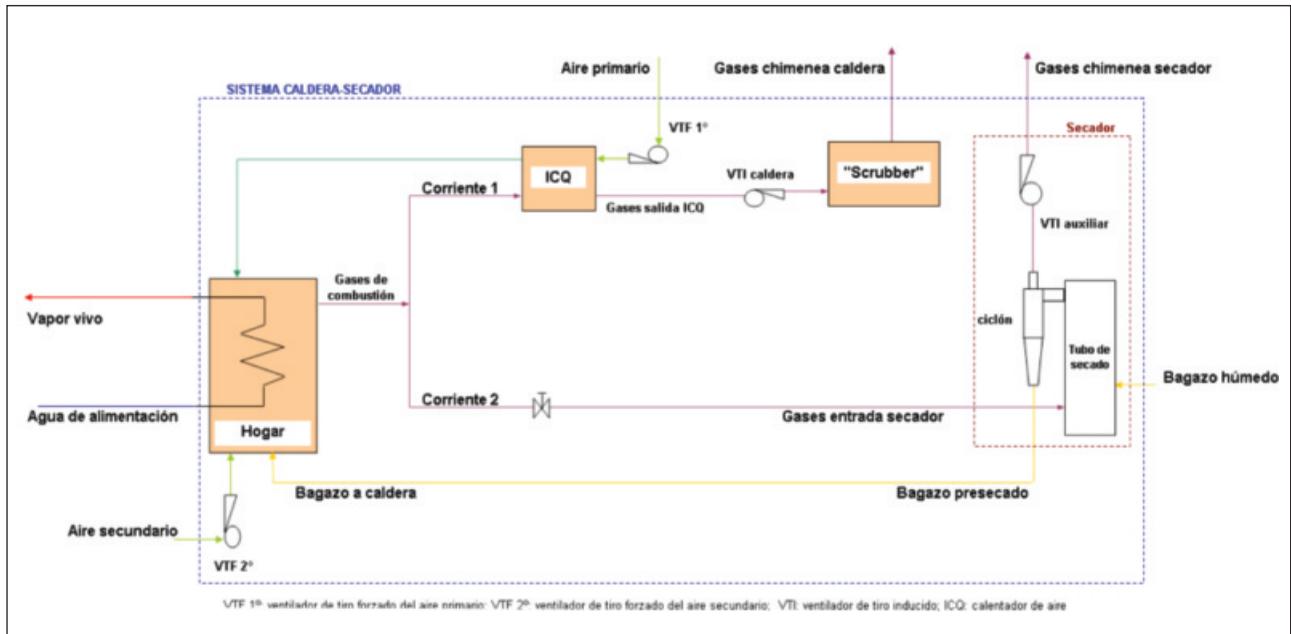


Figura 2. Esquema básico del secador de bagazo de la caldera.

de la composición elemental propuesta por Hugot (1963) y, para el RAC y la vinaza, mediante un equipo Carlo Erba EA 1108 del Laboratorio del Instituto de Química Física de los Materiales, Medio Ambiente y Energía (Inquimae), de la Universidad de Buenos Aires (UBA) (Tabla 1).

Para todos los casos de estudio y de ensayos, se preparó una muestra del combustible de ingreso al horno y, según norma ASTM D1857 (ASTM, 2003), se determinó su temperatura de ablandamiento de cenizas (ST) en un equipo para análisis de termofusión, marca Leco, modelo AF700.

Durante los ensayos se midieron las concentraciones de material particulado total (MPT) en los gases efluentes por chimenea de la caldera de vapor y del secador de bagazo. Estas determinaciones se realizaron siguiendo la Norma USEPA Method 5 (Golato *et al.*, 2012).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Tabla 1 muestra la composición, en base seca y libre de cenizas, de los combustibles involucrados en el estudio.

Tabla 1. Composición (porcentaje en peso, base seca libre de cenizas) de los combustibles.

	C	H	O
Bagazo	48,20%	6,70%	45,10%
RAC	46,00%	6,10%	46,70%
Vinaza	45,60%	6,30%	48,10%

En la Figura 3 se muestran los balances de materia y energía para la combustión de bagazo húmedo (los

valores en color rojo corresponden a datos de entrada).

En la Tabla 2 se muestran los resultados teóricos obtenidos para la combustión de mezclas de bagazo húmedo, vinaza de diferentes concentraciones de sólidos y/o RAC, considerando igual producción de vapor en la caldera del ingenio.

En la Tabla 3, se muestran los resultados teóricos obtenidos para la combustión de bagazo presecado y de mezclas de este con vinaza de diferentes concentraciones de sólidos y/o RAC, considerando igual producción de vapor en la caldera del ingenio.

En las Tablas 2 y 3 se observa que, para emplear la totalidad de la vinaza, esta debería llevarse a concentraciones de aproximadamente 60° Bx (vinaza 60) si se emplea únicamente bagazo húmedo, y a concentraciones de 18° Bx aproximadamente, si se emplea bagazo presecado y RAC. Cabe destacar que, en todos los casos, se lograría un importante ahorro de bagazo. Asimismo, se observa que la temperatura de ablandamiento de las cenizas resultó mayor que la temperatura teórica de combustión en todos los casos analizados.

En la Figura 4 se muestran los resultados de ensayos realizados en la caldera con secador de bagazo (los valores en color rojo corresponden a datos de entrada).

En la Figura 4 puede verse que al momento de los ensayos con secador de bagazo, la caldera tenía importantes infiltraciones de aire en el ICQ, la humedad del bagazo era de 52,46% y la producción de vapor era de solo 36.230 kg/h.

La concentración de material particulado total efluente por la chimenea del secador fue de 1293,7

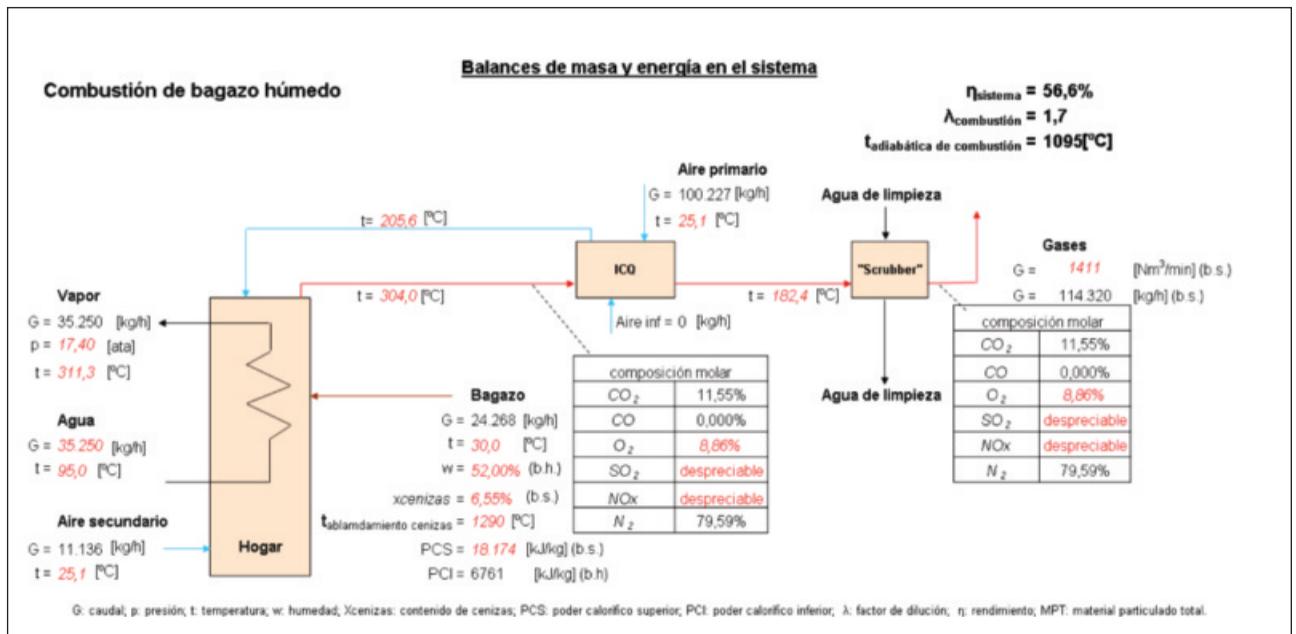


Figura 3. Resultados de balances para la combustión de bagazo húmedo.

Tabla 2. Cuadro comparativo de la combustión de mezclas con bagazo húmedo.

		Caldera original	Bagazo húmedo + vinaza 60	Bagazo húmedo + vinaza 18 + RAC	Bagazo húmedo + vinaza 14 + RAC	Bagazo húmedo + vinaza 11 + RAC
Vapor	kg/h	35.250	35.250	35.250	35.250	35.250
Bagazo %caña (total = 30%caña)	%caña	30,0%	27,2%	17,5%	17,8%	18,1%
Bagazo/bagazo original	%	100,0%	90,7%	58,3%	59,4%	60,5%
Vinaza (10,5 Bx)	kg/h	0	10.989	5.385	4.176	2.857
Vinaza %caña (total = 13,6%caña)	%caña	-	13,6%	6,7%	5,2%	3,5%
Sólidos	°Bx	0,0	60,0	17,9	14,7	11,0
Vinaza/vinaza correspondiente a bagazo original	%	-	100%	49%	38%	26%
RAC (15%w)	kg/h	0	0	6067	6067	6067
RAC/bagazo húmedo original	%	-	-	25%	25%	25%
Combustible mezcla al horno	kg/h	24.268	24.028	23.514	23.602	23.605
Humedad combustible mezcla	%b.h.	52,0%	51,0%	46,7%	46,9%	47,0%
Ceniza en combustible mezcla	%b.s.	6,55%	7,66%	8,89%	8,78%	8,66%
Ceniza	kg/h	763	902	1.115	1.101	1.084
Ceniza /ceniza original	%	100,0%	118,3%	146,1%	144,2%	142,0%
Temperatura del aire caliente	°C	205,6	206,5	209,3	209,1	209,0
Aire total	kg/h	111.364	109.384	107.423	107.854	108.023
Factor de dilución	kg/h	1,72	1,71	1,65	1,65	1,65
Temperatura adiabática de combustión	°C	1095	1108	1115	1112	1111
Temperatura estimada de combustión	°C	931	941	948	946	945
Temperatura de ablandamiento de ceniza*	°C	1290	1234	1277	1212	1243

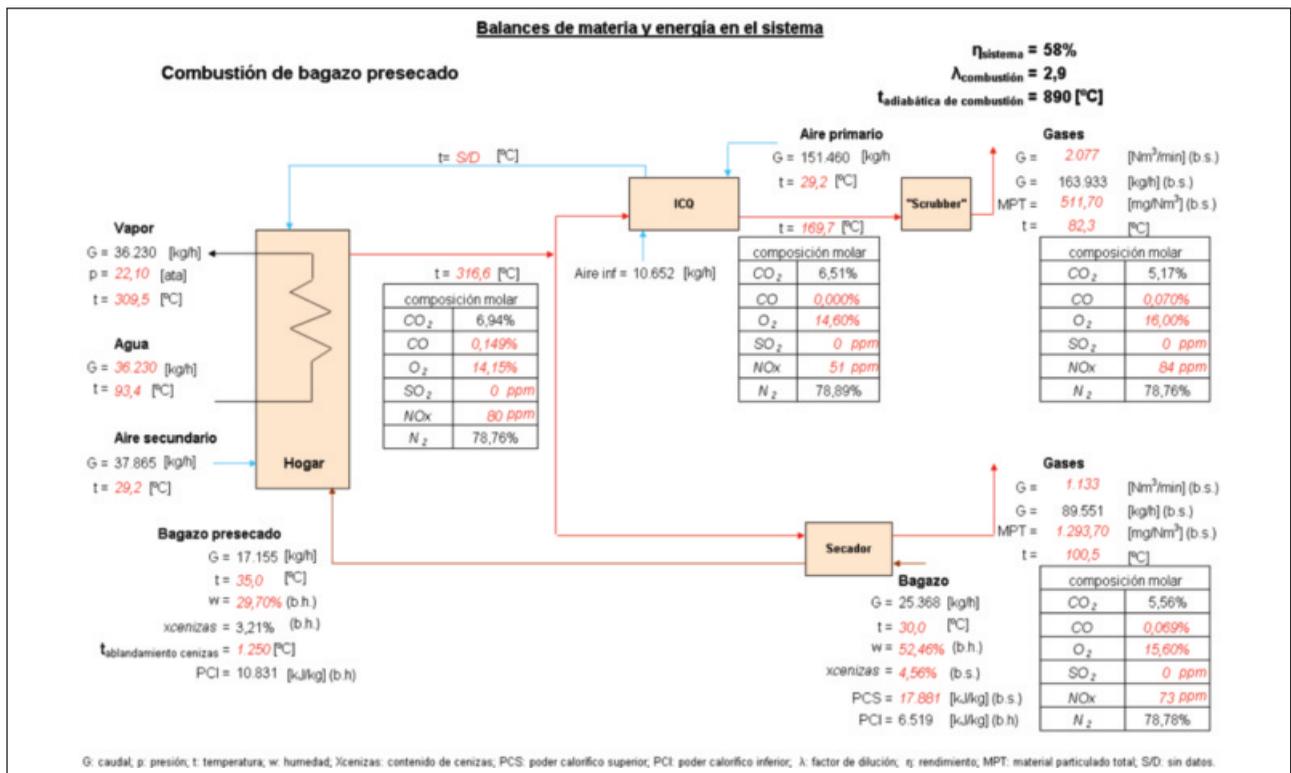


Figura 4. Resultados de balances para la caldera con secador de bagazo.

Tabla 3. Cuadro comparativo de la combustión de mezclas con bagazo presecado.

		Bagazo presecado	Bagazo presecado + vinaza 18	Bagazo presecado + vinaza 14	Bagazo presecado + vinaza 10	Bagazo presecado + vinaza 18 + RAC	Bagazo presecado + vinaza 14 + RAC	Bagazo presecado + vinaza 10 + RAC
Vapor	kg/h	35.250	35.250	35.250	35.250	35.250	35.250	35.250
Bagazo %caña (total = 30%caña)	%caña	26,1%	28,4%	28,8%	29,3%	16,9%	17,4%	18,0%
Bagazo/bagazo original	%	87,1%	94,5%	96,1%	97,7%	56,2%	57,9%	59,9%
Bagazo seco	kg/h	16996	18886	19200	19511	11196	11520	11905
Humedad bagazo seco	%b.h.	40,3%	41,7%	41,7%	41,7%	41,5%	41,5%	41,4%
Vinaza (10,5 Bx)	kg/h	0	8.792	6.813	4.725	10.989	8.242	5.715
Vinaza %caña (total = 13,6%caña)	%caña	-	10,9%	8,4%	5,8%	13,6%	10,2%	7,1%
Sólidos	°Bx	0,0	17,9	14,7	11,0	17,9	14,7	11,0
Vinaza/vinaza correspondiente a Bagazo	%	-	80%	62%	43%	100%	75%	52%
RAC (15%w)	kg/h	0	0	0	0	6067	6067	6067
RAC/bagazo húmedo original	%	-	-	-	-	25%	25%	25%
Combustible mezcla al horno	kg/h	16.996	24.289	24.285	24.236	24.016	23.739	23.687
Humedad combustible mezcla	%b.h.	40,3%	50,7%	50,8%	50,9%	46,2%	46,0%	46,1%
Ceniza en combustible mezcla	%b.s.	6,55%	7,43%	7,23%	7,02%	9,34%	9,11%	8,88%
Ceniza	kg/h	665	890	864	836	1.206	1.167	1.133
Ceniza /ceniza original	%	87,1%	116,6%	113,2%	109,6%	158,1%	152,9%	148,5%
Temperatura del aire caliente	°C	167,5	167,7	167,6	167,5	170,2	170,3	170,2
Aire total	kg/h	87.869	111.486	111.700	111.787	109.331	108.751	108.887
factor de dilución	kg/h	1,56	1,70	1,70	1,70	1,64	1,64	1,64
Temperatura adiabática de combustión	°C	1283	1094	1092	1092	1102	1106	1105
Temperatura estimada de combustión	°C	1091	930	929	928	936	940	939
Temperatura de ablandamiento de ceniza*	°C	1290	1166	1047	1198	1123	1260	1146

mg/Nm³ (base seca) y la de salida de la chimenea del “scrubber” fue de 511,7 mg/Nm³ (b.s.), siendo el valor promedio 787,7 mg/Nm³ (b.s.).

En la Figura 5 se muestran los resultados obtenidos para los ensayos experimentales de combustión de vinaza 11 mezclada con bagazo presecado y RAC (los valores en color rojo corresponden a datos de entrada).

La caldera mantuvo una combustión satisfactoria durante los ensayos con la mezcla y se emplearon 26.794 kg/h de bagazo húmedo, 4820 kg/h de RAC y 3780 kg/h de vinaza, que representan un 75,7%, 13,6% y 10,7% respectivamente en la mezcla. No se observaron variaciones importantes en la cantidad de cenizas ni en el contenido de NOx y SO₂.

La concentración de material particulado total efluente por la chimenea del secador fue de 934,2 mg/Nm³ (base seca) y la de la salida de la chimenea del “scrubber”

fue de 752,2 mg/Nm³ (b.s.), siendo el valor promedio 825,1 mg/Nm³ (b.s.): un valor que superaba al del caso de combustión de bagazo presecado en solo un 4,7%.

La temperatura adiabática de combustión resultó menor que la temperatura de fusión de las cenizas.

La Tabla 4 muestra un resumen de los valores históricos de la caldera operando con secador de bagazo, además de los valores obtenidos para los ensayos de combustión de bagazo presecado y de combustión de la mezcla de bagazo presecado, RAC y vinaza 11.

Al momento de realizar los ensayos experimentales, la caldera se encontraba funcionando con importantes infiltraciones de aire en el precalentador y, en consecuencia, con un alto factor de dilución y una baja producción de vapor.

Durante los ensayos experimentales con la mezcla combustible (bagazo presecado, RAC y vinaza cruda) se

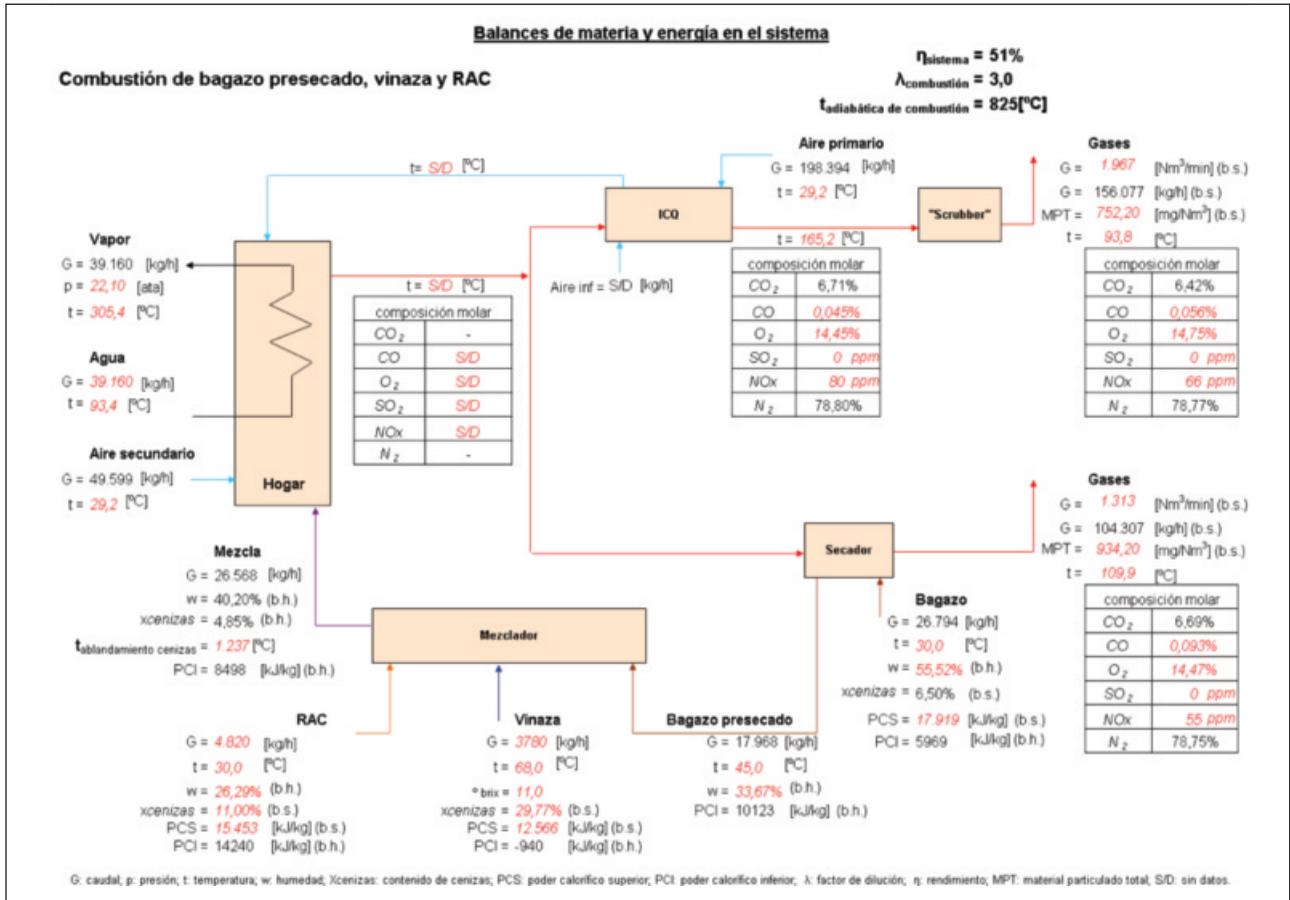


Figura 5. Resultados para la combustión de vinaza de 11° Bx con bagazo presecado y RAC.

empleó un 28,4% de vinaza en relación a la vinaza de la destilería; con respecto al funcionamiento con bagazo presecado, la producción de vapor aumentó un 8,1% (de 36,2 t/ha a 39,2 t/h) y la humedad del bagazo húmedo fue un 0,6% superior (aumentó de 52,5% a 55,5%). Haciendo un prorrato, para igual humedad de bagazo (52,5%) y la misma cantidad de vapor (36.230 kg/h), el ahorro de bagazo resulta del 8,6% con respecto al caso de combustión de bagazo presecado, o del 21,1% con respecto al bagazo consumido por la misma caldera operando únicamente con bagazo húmedo y sin secador de bagazo.

Además de los problemas de infiltración, la humedad del RAC empleado (26,3%) fue mayor que la humedad que suele alcanzarse con el presecado a campo (15%), debido a las condiciones meteorológicas de la época. Los cálculos teóricos indican que operando sin infiltraciones y con RAC de 15% de humedad, la cantidad de vinaza empleada debería ser mayor.

CONCLUSIONES

El estudio teórico muestra que se podrían emplear diferentes proporciones de mezcla de vinaza cruda o

concentrada con bagazo húmedo o presecado y RAC en calderas bagaceras, con lo cual además del beneficio de la disposición de la vinaza, se obtendrían en algunos casos importantes ahorros de bagazo.

Los ensayos preliminares realizados muestran que es posible quemar mezclas de bagazo presecado, RAC y vinaza en calderas bagaceras convencionales. Para una relación de mezcla de un 75,7% de bagazo húmedo, un 13,6% de RAC y un 10,7% de vinaza, se obtuvo una combustión estable y un ahorro de bagazo del 21,1% con respecto al bagazo consumido por la misma caldera, operando únicamente con bagazo húmedo y sin secador de bagazo. Se empleó un 28,4% de vinaza en relación a la vinaza de la destilería.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio tuvo apoyo financiero del Proyecto Federal por Tucumán PFIP-Espro 2009, N° 164/10, Combustión de vinaza con materiales celulósicos y/o biogas, otorgado al Centro Azucarero Regional Tucumán (CART), cuyas unidades ejecutoras fueron la Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC), la Universidad Nacional de Tucumán (UNT) y la Planta

Tabla 4. Combustión de bagazo presecado y de la mezcla seleccionada en la caldera.

		Histórico con bagazo presecado	Ensayos con bagazo presecado	Ensayos con bagazo presecado, vinaza y RAC
Vapor	kg/h	45.930	36.230	39.160
Bagazo húmedo	kg/h	22.171	25.368	26.794
Humedad del bagazo húmedo	%	53%	52,5%	55,5%
Humedad bagazo seco	%b.h.	45,0%	29,7%	33,7%
Vinaza (11 Bx)	kg/h	-	-	3.780
Vinaza %caña (total = 13,6%caña)	%caña	-	-	3,9%
Sólidos	°Bx	-	-	11,0
Vinaza/vinaza correspondiente a bagazo húmedo	%	-	-	28,4%
RAC	kg/h	-	-	4820,0
Humedad RAC	%	-	-	26,3%
Rac/bagazo húmedo	%	-	-	16%
Combustible mezcla al horno	kg/h	18.946	17.155	26.568
Humedad combustible mezcla	%b.h.	45,0%	29,7%	40,2%
Ceniza en combustible mezcla	%b.h.	2,75%	3,21%	4,85%
PCI combustible mezcla	kJ/kg	8115	10831	8498
Factor de dilución combustión	-	1,63	2,86	3,02
Temperatura adiabática de combustión	°C	S/D	890	825
Temperatura de fusión de cenizas	°C	S/D	1250	1237
NOx	ppm	S/D	80	62
SO ₂	ppm	S/D	0	0
PMT	mg/Nm ³	S/D	788	825

Piloto de Procesos Industriales Microbiológicos (Proimi) (período 03/2011-08/2013).

Se agradece especialmente la colaboración del Ingenio Santa Bárbara, donde se realizaron los ensayos, y la del Ingenio Concepción y de la Papelera Tucumán.

También los autores expresan su gratitud hacia la Asociación Cooperadora de Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología de la UNT y a la Secretaría de Estado de Innovación y Desarrollo Tecnológico (Sidetec), por su constante apoyo para la concreción de este proyecto.

BIBLIOGRAFÍA CITADA

- American Society for Testing and Materials (ASTM).** 2003. ASTM D1857, Standard Test Method for Fusibility of Coal and Coke Ash. ASTM, West Conshohocken, Estados Unidos.
- 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.
- Casen, S. D.; E. R. Romero; J. Fernández de Ullivarri; P. Fernández González; A. Sánchez Ducca; D. Peréz; F. Soria; P. Digonzelli; L. Alonso y D. Duarte.** 2011. RAC potencialmente disponible en el área cañera de Tucumán y alternativas de enfiado. En: Resúmenes de la Reunión Técnica Nacional de la Caña de Azúcar, 17, Orán, Salta, R. Argentina, pp. 179-183.
- 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.
- Fadda, G. y M. Morandini.** 2007. El uso agrícola de la vinaza. Revisión de antecedentes y caracterización de las condiciones del área cañera tucumana para su aplicación. Publ. Espec. EEAO (33).
- 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.
- Golato, M. A.; W. D. Morales; H. S. Mendez; E. A. Feijoo**

- y D. Paz. 2012.** Monitoreo de emisiones de material particulado de chimeneas de generadores de vapor de la industria azucarera de Tucumán, R. Argentina. *Rev. Ind. Agríc. de Tucumán* 89 (1): 11-19.
- Goyes, A. y G. Bolaños. 2005.** Un estudio preliminar sobre el tratamiento de vinazas en agua supercrítica. XXIII Congreso Colombiano de Ingeniería Química, Manizales, agosto 24 a 26 de 2005. [En línea]. Disponible en http://www.revistavirtualpro.com/files/TIE07_200612.pdf (consultado 10 marzo 2013).
- Hugot, E. 1963.** Manual para ingenieros azucareros. Cia Editorial Continental, D.F., México.
- ISGEC, 2013.** Bagasse & Biomass Fired Boilers. Catálogo de la firma Indian Sugar and General Engineering Corporation (ISGEC). Impreso en Junio de 2013.
- López Hernández, J. 1991.** Treatment of alcohol distillery effluent using sugar cane pith. *Int. Sugar Jnl.* 93 (1112): 155-158.
- Morandini, M. y E. Quaia. 2013.** Alternativas para el aprovechamiento de la vinaza como subproducto de la actividad sucroalcoholera. *Avance Agroind.* 34 (2) (dossier): 1-12.