

Rendimiento térmico de calderas bagaceras modernas en Tucumán, R. Argentina

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

RESUMEN

Se evaluaron tres calderas de vapor modernas instaladas en ingenios azucareros de Tucumán, R. Argentina, equipos que se encuadran dentro de las tecnologías de producción más limpia. Tomando como base la metodología de cálculo de la eficiencia térmica de generadores de vapor desarrollada en 2008 por la Sección Ingeniería y Proyectos Agroindustriales de la Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres, y a partir de los datos recolectados por medio de mediciones y balances de materia y energía, se determinaron sus principales variables características de operación. Las eficiencias energéticas determinadas para cada una fueron del 73,5%; 75,2% y 77,3%. Se realizó además una comparación con las calderas de vapor convencionales y se determinó el ahorro de bagazo que puede obtenerse con las calderas modernas, el cual resultó ser de un 27,6%. Como una ventaja adicional, se hace mención a la posibilidad de mejora del rendimiento térmico del ciclo motriz de la planta, que viene acompañada con el aumento de la presión de trabajo de la caldera.

Palabras clave: mediciones, energía, biomasa, vapor.

ABSTRACT

Thermal efficiency of modern bagasse boilers in Tucumán, Argentine

Three modern steam boilers, installed in sugar mills in Tucumán, R. Argentine to attain a cleaner production, were evaluated. Their major operating variables were determined using the methodology for calculating thermal efficiency of steam generators developed by Sección Ingeniería y Proyectos Agroindustriales of Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres in 2008, and data obtained from measurements and material and energy balances. Energy efficiency values determined for each boiler were 73.5%, 75.2% and 77.3%, respectively. A comparison with conventional steam boilers was drawn and it was found that bagasse savings amounted to about 27.6% when modern boilers were used. The possibility of improving the thermal efficiency of the plant cycle by increasing boiler pressure is mentioned as an additional advantage.

Key words: measurements, energy, biomass, steam.

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

INTRODUCCIÓN

Las calderas modernas de la industria azucarera son unidades productoras de vapor que permiten la quema de una amplia gama de combustibles con características diferentes, entre ellos, los combustibles fibrosos tales como bagazo de caña, "chips" de madera, residuos forestales u otros derivados de biomasa. Estos combustibles pueden ser quemados aisladamente o en combinación con carbón, petróleo o gas natural.

La industria azucarera de Tucumán ha incorporado calderas modernas que consumen bagazo como único combustible; dada su relativamente elevada altura, el aire caliente de turbulencia, que se distribuye estratégicamente a distintos niveles de elevación, y la alimentación neumática permiten que la biomasa se queme en suspensión cumpliendo las etapas del proceso de combustión en forma progresiva: evaporación de la humedad, destilación y oxidación de los componentes volátiles y finalmente del carbono fijo, con un consecuentemente mayor tiempo de permanencia del combustible y un factor de dilución bajo. Esto implica un mejor aprovechamiento de este y la posibilidad de quemar bagazo con relativamente alta humedad, sin la necesidad de emplear combustibles adicionales.

A diferencia de las calderas convencionales, las calderas modernas poseen un intercambiador de calor que, además de precalentar el aire de combustión, calienta el aire de turbulencia ("over-fire"), lo que mejora el rendimiento térmico del sistema (Golato *et al.*, 2005). Además, poseen un equipo de recuperación de calor adicional (economizador), que sirve para elevar la temperatura del agua que llega al domo y mejorar aún más su eficiencia, alcanzando valores cercanos al 85% cuando se quema solamente bagazo. A su vez, las calderas modernas generalmente trabajan a mayor presión que las convencionales, lo cual posibilita la mejora del rendimiento térmico del ciclo de la planta (Subramanian and Awasthi, 2010). Esto tiene mucha importancia para la cogeneración de energía eléctrica y de vapor para calefacción. Por otro lado, la incorporación de sistemas avanzados de control le atribuye seguridad, confiabilidad y precisión, que se ven reflejadas en sus índices de operación.

Estas mejoras, que permiten una mayor producción de vapor y de energía eléctrica, en el caso de cogeneración para venta a la red pública, a partir de la misma cantidad de biomasa y sin el aporte de combustibles de origen fósil, hacen de las calderas modernas una importante tecnología de producción más limpia, entendiéndose como tal aquella tecnología que permite producir sin el uso de materias primas tóxicas, ahorrando recursos y minimizando la cantidad y toxicidad de todas las emisiones y desechos.

El objetivo del presente trabajo fue evaluar energéticamente tres calderas bagaceras modernas de ingenios de la provincia de Tucumán, mediante ensayos de mediciones y cálculos de balances de masa y energía.

MATERIALES Y MÉTODOS

Características de los sistemas ensayados

Las unidades que fueron objeto de este estudio fueron del tipo acuotubular, diseñadas para la combustión de bagazo en suspensión, garantizando una buena circulación de los gases calientes en la zona donde se introduce el combustible y, por ende, el secado rápido del bagazo.

Con respecto al hogar o cámara de combustión de los generadores de vapor modernos, ellos se encontraban construidos con paredes de tubos de agua del tipo membrana, soportadas desde el exterior por una estructura metálica, para limitar el uso de material refractario y eliminar fugas y depósitos de cenizas en el horno, proporcionando una buena estanqueidad de la cámara de combustión, con bajos costos de mantenimiento.

En la Figura 1 puede verse el esquema de una caldera de este tipo, con su grilla de tipo volcable (1), los domos (2), el haz convectivo (3), un sobrecalentador de vapor (4) y el sistema de alimentación del combustible del tipo neumático (5).

Estos generadores operaban con tiro balanceado y poseían un ventilador de tiro forzado (VTF), que introducía aire a través de un calentador (ICQ), y un ventilador de tiro inducido (VTI), que aspiraba los gases producto de la combustión y los conducía al ambiente a través de la chimenea.

Las calderas modernas además se encontraban equipadas con equipos lavadores de gases ("scrubbers") (Figura 2), con el objeto de reducir la emisión de material particulado por las chimeneas.

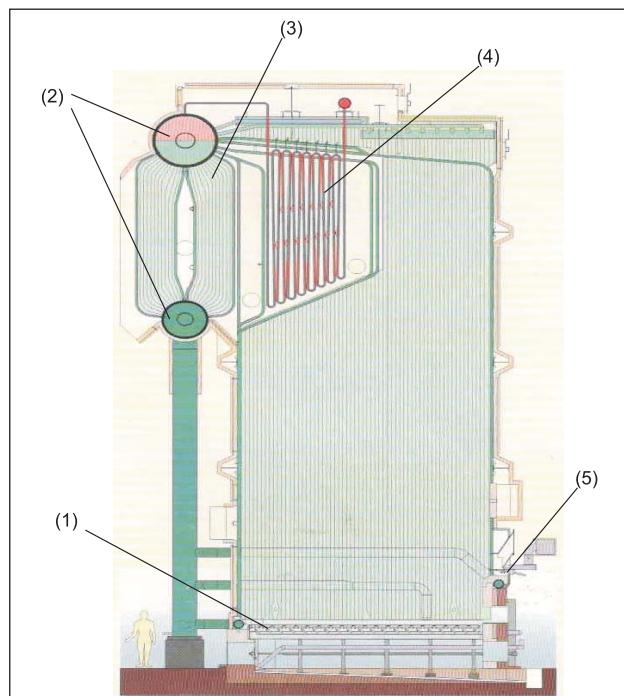


Figura 1. Esquema de una caldera de vapor moderna en su corte seccional (fuente: Catálogo HPB de generadores de vapor, año 2006).



Figura 2. Vista lateral de una caldera moderna en operación en un ingenio azucarero de Tucumán. 2008.

La primera unidad moderna ensayada (caldera N°1) poseía una superficie de calefacción de 2680 m², con una producción nominal de 120 t/h a una presión manométrica de 22 kg/cm² y una temperatura de vapor de 350°C. Esta caldera poseía una grilla viajera y operaba con precalentador de aire, de 6552 m² de superficie de transferencia de calor, un sistema de inyección de aire secundario caliente para favorecer la turbulencia en el interior del hogar, un economizador de 1005 m² de superficie y un lavador de gases.

Las otras dos calderas modernas (Nº 2 y Nº 3) poseían una superficie de calefacción de 2680 m², con una producción nominal de 120 t/h a una presión manométrica de 42 kg/cm² y una temperatura de vapor de 450°C. Estas calderas poseían una grilla inclinada ("pin hold") y operaban con precalentador de aire de 4167 m² de superficie de transferencia de calor, un sistema de inyección de aire secundario caliente para favorecer la turbulencia en el interior del hogar, un economizador de 1614 m² de superficie y un lavador de gases. Estas dos calderas seleccionadas eran similares: la única diferencia fue que una trabajaba a mediana presión (33 bar) y la otra a alta presión (43 bar).

Ensayos en calderas de vapor modernas

En la Figura 3 se observa un esquema básico de una caldera bagacera moderna, en el cual se indican los puntos

de medición y muestreo de las variables características de operación.

En la Tabla 1 se detallan para cada punto de medición, las respectivas variables medidas en fábrica y determinadas en laboratorio, necesarias para la resolución de los balances de masa y energía para una caldera bagacera moderna.

Las variables de los puntos de medición se obtuvieron de los instrumentos instalados en la planta de calderas y empleando instrumental portátil perteneciente al Laboratorio de Mediciones Industriales de la Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC).

Para determinar la concentración porcentual de CO₂, O₂ y CO en gases secos, se utilizó un analizador electrónico de gases de combustión marca Testo, modelo 454, con rango de 0 %vol a 25 %vol y resolución de 0,1 %vol para el O₂ y rango de 0 ppm a 10000 ppm y resolución de 1 ppm para el CO, resultando el CO₂ obtenido por cálculo. Con este instrumento, además se determinó el factor de dilución (por cálculo) en función del tipo de combustible seleccionado y la temperatura de los gases, con rango de -40°C a 1200°C (Golato *et al.*, 2005). Estas mediciones se practicaron a la entrada del precalentador de aire, a su salida y en la chimenea.

La medición del flujo de gases secos y de la emisión de material particulado efluente por chimenea se efectuó con

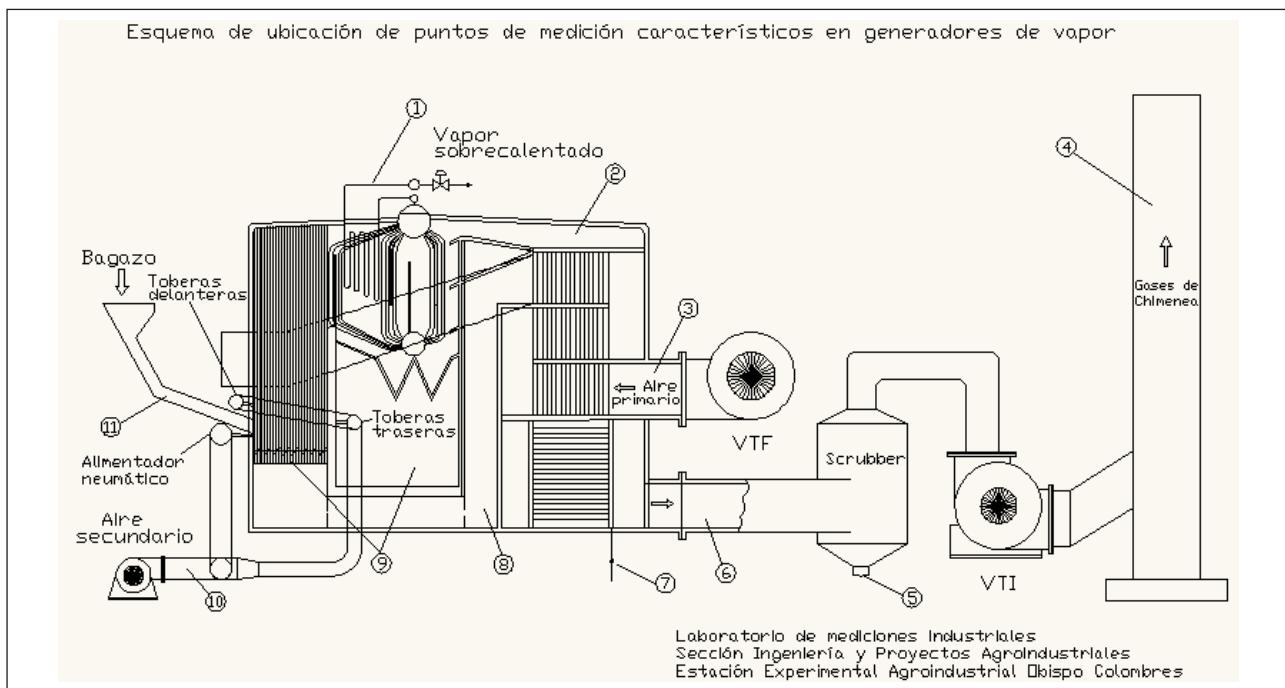


Figura 3. Esquema de un generador de vapor para bagazo del tipo acuotubular moderno, con la indicación de los puntos de medición.

Tabla 1. Variables de medición características de un generador de vapor.

| Punto de medición | Denominación | Variables medidas |
|-------------------|---|--|
| 1 | Salida de vapor de la caldera | Caudal de vapor [t/h] Temperatura de vapor sobre calentado [°C] Presión de vapor sobre calentado |
| 2 | Entrada de gases al precalentador de aire | Concentración de O ₂ , CO ₂ y CO [%] en gases secos Factor de dilución Temperatura de los gases de combustión [°C] |
| 3 | Entrada del aire primario frío al precalentador | Temperatura del aire primario frío [°C] Concentración de O ₂ , CO ₂ y CO [%] en gases secos Caudal de gases secos de chimenea [m ³ /h] Humedad de gases de chimenea Temperatura de gases [°C] Emisión de material particulado [kg/h] |
| 4 | Salida de gases por chimenea | Caudal de agua de salida [kg/h] Contenido de carbono en el agua [kg C/kg agua] |
| 5 | Salida del agua "scrubber" (lavador de gases) | Factor de dilución |
| 6 | Salida de gases del economizador | Temperatura de los gases de combustión [°C] Caudal de agua de alimentación [m ³ /h] Temperatura del agua de alimentación [°C] Temperatura del agua caliente [°C] |
| 7 | Economizador | Temperatura del aire caliente [°C] |
| 8 | Salida del aire primario caliente del precalentador | Contenido de carbono [kgC/kg cenizas] |
| 9 | Cenizas | Temperatura del aire [°C] |
| 10 | Entrada aire secundario | Temperatura [°C] Humedad [%] |
| 11 | Boca de alimentación de bagazo | Cantidad de cenizas [%] |

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 de la United States Environmental Protection Agency (USEPA, 1970). La cantidad de material particulado se determinó por gravimetría con una balanza analítica marca Ohaus Explorer Pro, modelo EP214C, cuyo rango va de 0 g a 200 g y su apreciación es de 0,0001 g.

La temperatura del aire caliente a la salida del precalentador de aire se midió con una termoresistencia tipo Pt-100, con cabezal de conexión normalizado, cable de extensión compensado y rango de trabajo de 0°C a 400°C. Para la lectura de la temperatura, se empleó un termómetro digital múltiple de seis canales, marca IEA, de resolución de 1°C y escala de 50°C a 500°C.

Para la determinación de humedad y cenizas del bagazo, se tomaron muestras de las bocas de alimentación de la caldera y se procesaron en los laboratorios de la EEAOC. La humedad del bagazo se determinó por desecación en estufa a 105°C, hasta obtener un peso constante. Los valores del contenido de cenizas se obtuvieron por incineración total en mufla computarizada a 550°C.

Para la medición de los flujos de agua, se utilizó un caudalímetro ultrasónico portátil de tiempo de tránsito, marca Flexim, modelo Fluxus ADM 6725, para rangos de velocidades de flujos de 0,01 m/s a 25 m/s y con una resolución de 0,025 cm y exactitud de $\pm 1\%$.

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

Se efectuaron seis lecturas de los parámetros evaluados durante las mediciones por ensayo, completando un total de cinco ensayos en cada caldera, con una duración de treinta a cuarenta minutos cada uno. Se emplearon los mismos equipos consignados en Golato *et al.* (2008).

Para el análisis estadístico de los registros experimentales, se utilizó la desviación estándar como parámetro de dispersión de los valores, empleándose la hoja de cálculo

lo Excel 2000. Como valor comparativo se ha utilizado el coeficiente de variabilidad, definido como la desviación estándar porcentual relativa al valor promedio:

$$CV\% = \frac{\text{Desv.est.}}{\text{VP}}$$

Donde:

Desv. est.: desviación estándar de las mediciones.

VP: promedio de los valores medidos.

En la Figura 4 se representa el generador de vapor en diagrama de bloques, pudiéndose observar las corrientes que ingresan y egresan del generador. Se muestra la entrada de bagazo, la entrada de aire caliente de combustión proveniente del precalentador de aire y el aire adicional de los alimentadores neumáticos, la entrada de agua y la correspondiente salida final del vapor.

Fundamentos del método de cálculo

Para los cálculos se utilizó la metodología de cálculo de la eficiencia térmica de generadores de vapor propuesta por Golato *et al.* (2008), con el agregado de un balance de energía para determinar la eficiencia del economizador.

La metodología citada consiste esencialmente en un conjunto de balances de masa y energía para la determinación de los flujos y eficiencias en el sistema, que toma como datos de partida las mediciones de sus principales variables operativas.

Golato *et al.* (2008) explicitan las ecuaciones necesarias para los cálculos, que se obtienen de los siguientes balances: tres balances de masa en el hogar (carbono, hidrógeno, oxígeno); un balance de masa en el ICQ, que incluye la entrada de aire infiltrado; balance de energía en la caldera; balance de energía en el ICQ; balance de energía en el horno y balance de materia en el lavador de gases. Se agregó, en el caso de este trabajo, la ecuación del balance de energía en el economizador.

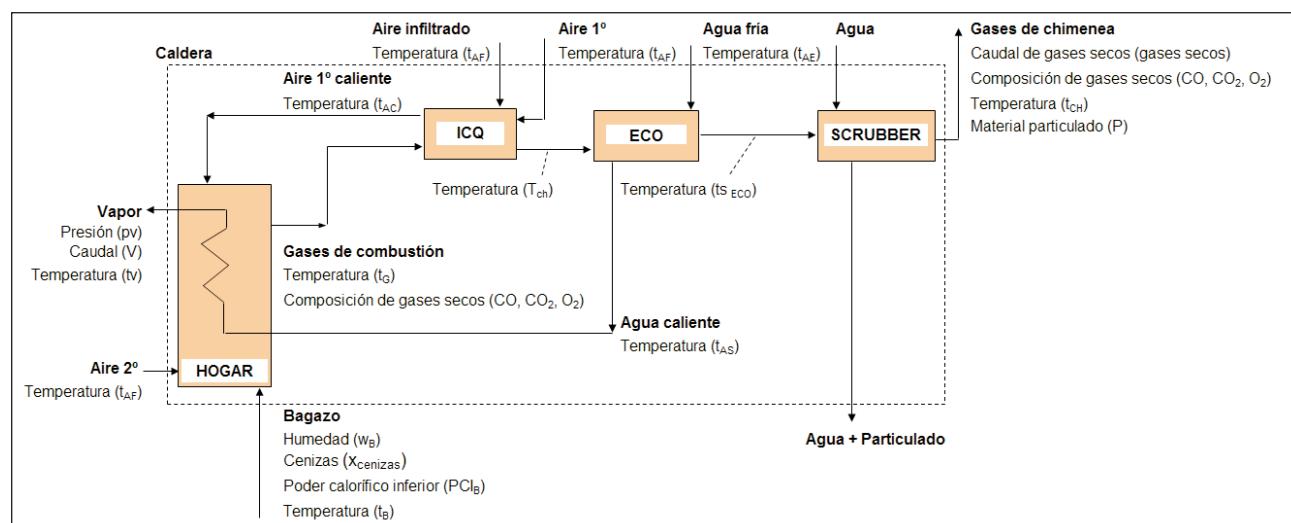


Figura 4. Diagrama de un generador de vapor con los datos de entrada necesarios, mostrando los centros de balances: hogar, precalentador de aire (ICQ), economizador (Eco), "scrubber" y caldera (enmarcada en líneas de trazo).

Balance de energía en el economizador:

$$V \cdot C_p_{\text{agua}} \cdot (t_{\text{AS}} - t_{\text{AE}}) = \text{Gases}_{\text{ICQ}} \cdot C_p_{\text{gases}} \cdot (t_{\text{SICQ}} - t_{\text{SECO}}) \eta_{\text{Eco}}$$

Donde:

V: caudal de agua de alimentación (kg/h).

Cp_{agua}: calor específico a presión constante del agua (kJ/kg°C).

t_{as}: temperatura del agua a la salida del economizador (°C).

t_{AE}: temperatura del agua de alimentación (°C).

Gases_{ICQ}: gases a la salida del ICQ (kg/h).

Cp_{gases}: calor específico medio de los gases (kJ/kg°C).

t_{SICQ}: temperatura de los gases a la salida del ICQ (°C).

t_{SECO}: temperatura de los gases a la salida del economizador (°C).

η_{Eco}: rendimiento energético del economizador.

Se llegó así a un total de nueve ecuaciones de balance.

Las incógnitas del sistema fueron:

1. Caudal de bagazo que ingresa al hogar (B).

2. Caudal de agua en los gases (agua_{gases}).

3. Caudal de aire total (aire): aire 1° + aire 2°

4. Caudal de aire infiltrado (A_{inf}).

5. Rendimiento energético del sistema de generación de vapor (η_{caldera}).

6. Rendimiento energético del calentador de aire (η_{ca}).

7. Rendimiento energético del horno o eficiencia de la combustión (η_{horno}).

8. Carbono que acompaña a los gases antes del "scrubber" (P_T).

9. Rendimiento energético del economizador (η_{eo}).

El grado de libertad del sistema era nulo, por lo tanto estaba completamente especificado.

Para la resolución del sistema se empleó la hoja de cálculo Excel 2000.

Se realizó también una comparación con una caldera convencional. Para ello se utilizaron los resultados obtenidos por Golato *et al.* (2008) para una caldera convencional del tipo acuotubular con grilla volcable, con una superficie de calefacción de 2660 m², una producción nominal de 80 t/h a una presión manométrica de 18 kg/cm² y una temperatura de vapor de 330°C. Dicha caldera operaba con un precalentador de aire, de 2571 m² de superficie, un sistema de inyección de aire secundario frío, un lavador de gases y carecía de economizador.

Para la mencionada comparación, se decidió utilizar la caldera N°1, ya que trabajaba aproximadamente a la misma presión que la caldera convencional en cuestión. Debido a que esta última producía menos vapor que la caldera moderna, se consideró que se contaba con dos calderas convencionales, que producían entre ambas la misma

cantidad de vapor que la caldera N°1. En función del índice de generación, se determinó la cantidad de bagazo que estas dos calderas consumirían, manteniendo las variables específicas constantes.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 2 se muestran los valores promedio de las variables medidas en los ensayos realizados en las calderas modernas.

Puede observarse que las producciones de vapor son, en todos los casos, menores a las nominales.

En base a la composición de los gases, pudo apreciarse una combustión eficiente.

En el caso de la caldera N°2, las condiciones de presión y temperatura fueron muy diferentes a las de diseño, pudiéndose distinguir una temperatura de gases a la salida del hogar (t_G) más elevada que en las otras dos calderas, lo cual indicaba un menor aprovechamiento del calor a través de las superficies de transferencia del hogar.

En todos los casos, el bagazo tuvo un alto contenido de humedad y cenizas.

A modo ilustrativo, en la Figura 5 se muestran los resultados de los balances para la caldera N°3.

Pueden observarse una importante infiltración de aire en el precalentador y bajos rendimientos, tanto del precalentador como del economizador. A pesar de ello, la eficiencia del sistema fue relativamente alta, debido a una correcta combustión y a un buen aprovechamiento de calor en el hogar.

En la Tabla 3 se presentan los valores calculados para las incógnitas del sistema, para las tres calderas. Como variable de validación se tabula el factor de dilución (1 + exceso de aire).

En todos los casos se observa una buena correspondencia entre el valor medido y el valor calculado para el factor de dilución.

El rendimiento del sistema (η_{caldera}) es elevado en todos los casos, en comparación con el de las calderas convencionales.

En la Tabla 4 se presenta una comparación, con los principales parámetros operativos, entre la caldera convencional y la caldera moderna.

Se observa que la eficiencia energética aumentó de 53,2% a 73,5%, es decir un 38% respecto de la caldera convencional; el índice de generación pasó de 1,4 a 1,9 kg vapor/kg bagazo (33,3% de aumento). El ahorro de bagazo esperado por cambio de tecnología fue de 27,6% del bagazo consumido por la caldera convencional.

Tabla 2. Valores promedio de las variables medidas en las calderas modernas.

| Variables medidas | Unidades | Caldera N°1 | | Caldera N°2 | | Caldera N°3 | | |
|------------------------|-----------------|----------------|-------|----------------|-------|----------------|-------|-------|
| | | Valor promedio | CV % | Valor promedio | CV % | Valor promedio | CV % | |
| V | kg/h | 105.800 | 2,72 | 108.144 | 6,58 | 115.800 | 11,27 | |
| pv | ata | 18,14 | 0,21 | 33,76 | 2,46 | 43,50 | 7,23 | |
| tv | °C | 341,40 | 1,40 | 439,50 | 0 | 392,30 | 1,02 | |
| Entrada ICQ | CO ₂ | % | 12,69 | 9,66 | 16,10 | 3,88 | 13,09 | 8,88 |
| | O ₂ | % | 7,20 | 2,41 | 3,50 | 12,45 | 6,10 | 7,15 |
| | CO | % | 0,023 | 15,06 | 0,104 | 7,63 | 0,011 | 24,05 |
| Salida Eco | CO ₂ | % | 12,52 | 6,30 | 16,10 | 2,71 | 11,95 | 14,58 |
| | O ₂ | % | 7,35 | 6,15 | 3,50 | 9,90 | 8,00 | 2,17 |
| | CO | % | 0,024 | 23,20 | 0,104 | 3,33 | 0,01 | 20,00 |
| P | kg/h | 97,00 | 2,73 | 41,40 | 10,63 | 62,00 | 2,79 | |
| λ | – | 1,54 | 1,12 | 1,20 | 5,20 | 1,41 | 1,88 | |
| Gases secos (chimenea) | kg/h | 239.745 | 7,18 | 207.603 | 3,64 | 263.735 | 13,90 | |
| t _G | °C | 310,00 | 0,85 | 340,80 | 0,53 | 307,80 | 1,74 | |
| t _{ch} | °C | 89,80 | 3,60 | 79,70 | 4,04 | 86,00 | 5,07 | |
| t _{AF} | °C | 25,10 | 1,83 | 21,20 | 2,50 | 16,00 | 7,10 | |
| t _{AC} | °C | 250,80 | 3,49 | 230,20 | 0,40 | 230,00 | 4,79 | |
| t _{AE} | °C | 103,10 | 1,24 | 99,80 | 1,46 | 113,50 | 0 | |
| t _{AS} | °C | 124,30 | 0 | 139,50 | 5,51 | 137,00 | 4,44 | |
| W _B | %peso (b.h.) | 52,00 | 1,02 | 55,00 | 7,93 | 52,00 | 1,02 | |
| Xcenizas | %peso (b.s.) | 6,55 | 3,04 | 6,55 | 4,02 | 6,55 | 3,04 | |

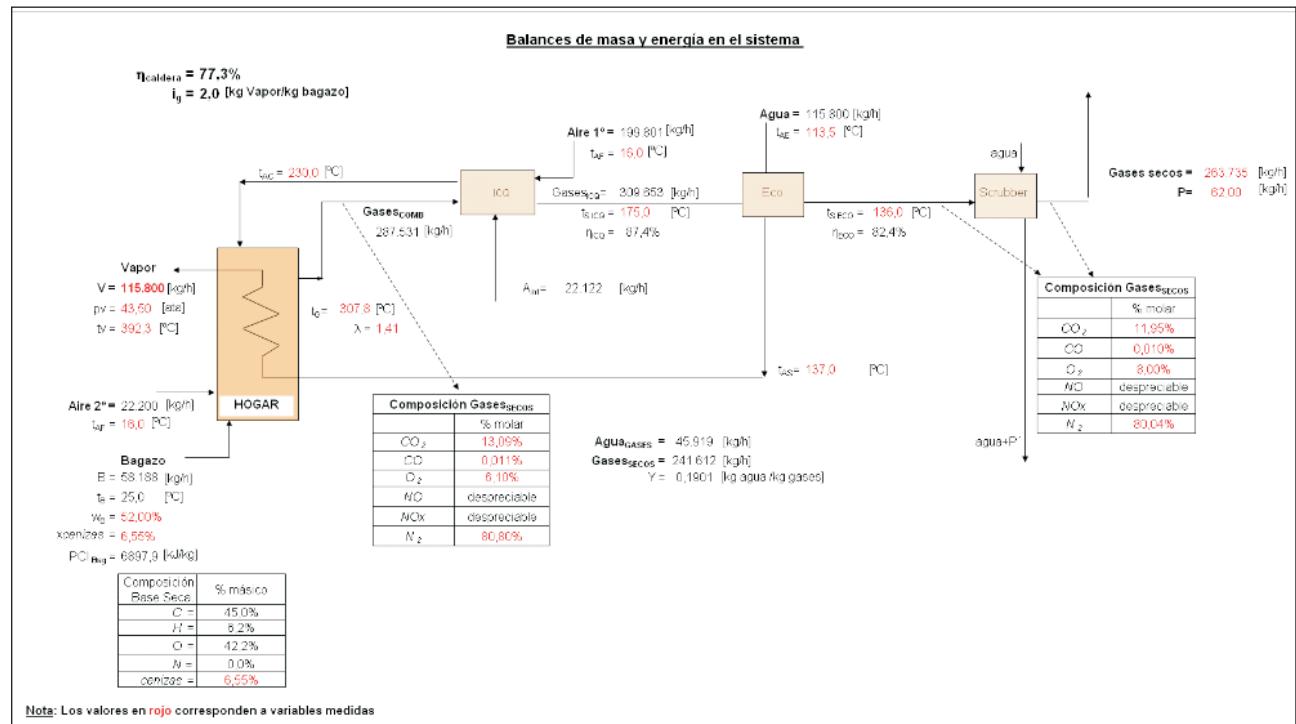


Figura 5. Resultado de los balances para la caldera N° 3.

Tabla 3. Resultados de cálculo de las variables principales y secundarias.

| Variables | Unidades | Caldera N°1 | Caldera N°2 | Caldera N°3 |
|--|--------------------|-------------|-------------|-------------|
| B | kg/h | 55.539 | 65.032 | 58.188 |
| Agua _{gases} | kg/h | 43.828 | 52.176 | 45.919 |
| Aire | kg/h | 225.111 | 194.552 | 222.000 |
| A _{inf} | kg/h | 2938 | - | 22.122 |
| η _{caldera} | % | 73,50 | 75,20 | 77,30 |
| η _{ICQ} | % | 94,90 | 93,60 | 87,40 |
| η _{Eco} | % | 93,80 | 91,20 | 82,40 |
| λ | - | 1,50 | 1,20 | 1,39 |
| Índice de generación (i _g) | kg vapor/kg bagazo | 1,90 | 1,70 | 2,00 |
| Variable de validación | | | | |
| λ (valor medido) | - | 1,54 | 1,19 | 1,41 |
| Error porcentual | % | 2,03 | 0,69 | 1,31 |

Tabla 4. Comparación entre caldera convencional y caldera moderna.

| | Unidades | Dos calderas convencionales | Caldera N°1 |
|------------------------------------|-----------------------|-----------------------------|-------------|
| Vapor | kg/h | 105.800 | 105.800 |
| Presión del vapor | ata | 17,4 | 18,4 |
| Temperatura del vapor | °C | 311,3 | 341,4 |
| Factor de dilución | - | 1,7 | 1,5 |
| Eficiencia del calentador | % | 86,9 | 94,9 |
| Eficiencia del economizador | % | - | 93,8 |
| Eficiencia de la caldera | % | 53,2 | 73,5 |
| Índice de generación | kg vapor/kg de bagazo | 1,4 | 1,9 |
| Bagazo quemado | kg/h | 76.667 | 55.539 |
| Ahorro de bagazo | kg/h | - | 21.128 |
| Ahorro de bagazo porcentual | % | - | 27,6 |

CONCLUSIONES

La metodología de cálculo que aplica la Sección Ingeniería y Proyectos Agroindustriales de la Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres para determinar la eficiencia térmica de un generador de vapor, basada en los balances de materia y energía, fue adecuada para evaluar los modernos generadores de vapor.

Pudo observarse una relativamente elevada eficiencia energética de los generadores modernos respecto a la de calderas convencionales. Esta puede atribuirse principalmente a una buena eficiencia de la combustión, que se ve reflejada en la composición de los gases, a una buena transferencia de calor en las zonas de calentamiento, evaporación y sobrecaleamiento, caracterizada por una menor temperatura de los gases a la salida del horno, y al aprovechamiento del calor de los gases en los equipos de recuperación de calor.

En el caso de la caldera N°3, pudo observarse que a pesar de tener una gran infiltración de aire en el precalentador, que afectó tanto a este como al economizador (por encontrarse este último aguas abajo en la corriente de gases), y de funcionar con un bagazo de contenido de humedad y cenizas mayores que los del diseño, la eficiencia energética del sistema fue del 77,3%.

En la caldera moderna N°2, no se advirtieron infiltraciones de aire y las eficiencias de los recuperadores de calor fueron buenas. La caldera funcionó a una presión menor a la nominal, lo que aumentó las irreversibilidades de la transferencia de calor entre los gases y el vapor en generación (Marín Hernández *et al.*, 2007). Sin embargo, si bien no llegó a producir la cantidad de vapor nominal, el rendimiento, trabajando a esta baja presión, fue de un 75,2%. Lo mismo sucedió en la caldera N°1, que trabajó a una baja presión y alcanzó un rendimiento del 73,5%.

Empleando la caldera moderna N°1 para producir vapor en cantidades y condiciones similares a las de las calderas convencionales, se pudo ahorrar aproximadamente un 27,6% de bagazo o de combustible adicional equivalente, en comparación con la caldera convencional.

A mayor presión de trabajo de las calderas, existe la posibilidad de mejorar el rendimiento térmico del ciclo y la capacidad de producción eléctrica de la planta, con lo cual aumentarían las posibilidades de cogeneración para venta de energía a la red. En una primera etapa, sería posible utilizar calderas modernas de alta presión trabajando a una presión más baja, lo cual, además de permitir realizar la inversión por etapas, permitiría un importante ahorro de bagazo o de combustible adicional equivalente.

Para una misma cantidad de biomasa, estas calderas modernas posibilitarían una mayor producción de vapor y de energía eléctrica para venta a la red pública, con la ventaja de no requerir el aporte de combustibles de origen fósil, lo que las encuadra dentro de las tecnologías de producción más limpia.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Agencia de Cooperación Internacional de Japón (JICA), por la capacitación brindada en temas concernientes a producción más limpia.

BIBLIOGRAFÍA CITADA

- 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.
- Marín Hernández, J. J.; M. L. González Petit-Jean y J. R. Mestizo Cerón. 2007.** Aplicación del método exergético para determinar pérdidas separadas e irreversibilidades en calderas bagaceras. Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica, 8, Cuzco, Perú. [En línea]. Disponible en www.congreso.pucp.edu.pe/cibim8/pdf/29/29-13.pdf. (consultado 8 julio 2011).
- Subramanian, A. K. and S. Awasthi. 2010.** High pressure multi fuel fired boilers for co-generation. En: Proc. ISSCT Congress, 27, Veracruz, México, 2010, pp.1-9.
- United States Environmental Protection Agency (USEPA). 1970.** Determination of particulate matter emissions from stationary sources. [En línea] 1: 371-442. Disponible en www.epa.gov/ttn/emc/promgate/m-05.pdf (consultado 8 julio 2011).