

# **X CONGRESO INTERNACIONAL DE LA SOCIEDAD MEXICANA DEL HIDRÓGENO “ENERGÍAS RENOVABLES”**

## **y IV CONGRESO NACIONAL DE USO RACIONAL Y EFICIENTE DE LA ENERGÍA CIUREE 2010.**

(Toluca, Estado de México. 27 de septiembre al 1 de octubre de 2010)

### **“BALANCE EXERGÉTICO DE CALDERAS QUE QUEMAN BIOMASA”**

**Marín Hernández J.J.\*, Del Ángel Ramos J.A., Mestizo Cerón J.R.**

Universidad Veracruzana  
Facultad de Ingeniería Mecánica Eléctrica  
Circuito Gonzalo Aguirre Beltrán S/N, 91000, Xalapa, Ver.  
México  
Teléfono: 52+228+421757  
Fax: 52+228+1411031  
\* [jmarin@uv.mx](mailto:jmarin@uv.mx)

#### **RESUMEN:**

Basándose en la propuesta metodológica presentada por Lozano y Valero para calderas instaladas en centrales termoeléctricas y tomando en cuenta las particularidades de una caldera bagacera, se realiza un diagnóstico energético y exergético de una caldera que quema bagazo Babcock & Wilcox (caldera N°2) instalada en un Ingenio Acucarero de Veracruz, la cual tiene una capacidad nominal de vapor producido de 36.32 t/h a 12.6 atm y 255 C. Se aplican los modelos convencionales para determinar los balances de masa y energía, asimismo se aplica novedosamente el método exergético para definir el balance de exergía. Los resultados obtenidos en el diagnóstico energético están dentro de lo normal, con una eficiencia global de 53.9%, originándose las mayores pérdidas en los gases de combustión emitidos al ambiente con 32.7%. El diagnóstico exergético arroja una eficiencia exergética de 18.4%, siendo las mayores pérdidas debidas a la irreversibilidad por combustión con 43.7%, por transferencia de calor en las superficies evaporadoras con 16% y por gases de combustión emitidos al ambiente con 8%.

**Palabras Clave:** *Método exergético, Caldera bagacera, Irreversibilidades.*

#### **“EXERGY METHOD APPLIED TO DETERMINE SEPARATED LOSSES AND IRREVERSIBILITIES IN BAGASSE BOILERS”**

#### **ABSTRACT:**

This paper shows an energy and exergy diagnosis based on the work developed by Lozano and Valero, which determines separated losses and irreversibilities in the bagasse boiler Babcock and Wilcox installed in the cane sugar factory “Mahuixtlán” whose production of steam of steam is 36.32 t/h at 12.6 atm and 255°C. Typical analysis is used to determine the mass and energy balances, however exergy method is applied originally to determine the exergy balance. The results of energy analysis are normal, the thermal efficiency of the boiler is 53.9%, the biggest losses are generated by exhausted gases with 32.7%. The exergy analysis shows an exergy efficiency of 18.4%, the biggest irreversibilities are generated by combustion process with 47.3%, followed by irreversibilities associated to heat transfer between hot gasses and steam with 16% and irreversibilities associated to exhausted gases with 8%.

**Keywords:** *Exergy Method, Bagasse Boiler, Irreversibilities.*

## INTRODUCCIÓN

Los ingenios azucareros se caracterizan por ser altamente consumidores y derrochadores de energía, en gran parte debido a la tecnología de baja eficiencia con la que cuentan. Es una realidad que la mayoría de las calderas bagaceras operan con tecnología de principios del siglo pasado pese a las deficiencias que presentan.

Benítez [1], destaca que dentro de un ingenio azucarero tradicional cubano, el área de generación de vapor presenta las principales pérdidas exergéticas con 53.3%.

A partir de la crisis del petróleo se deciden crear nuevos diseños, básicamente haciendo cambios de los anteriores o bajo nuevos criterios; se tienen como ejemplo en Cuba la caldera RETAL que nace a partir de la Stirling de cuatro domos, la RETO, EKE, PQS, entre otras. Sin embargo, todos estos diseños están fundamentados bajo criterios técnico-económicos del primer principio de la termodinámica sin hasta el momento, haber recurrido a modernas y efectivas metodologías como la el método exergético o la termoeconomía.

Mientras que sobre la base de la primera ley se determinan eficiencias térmicas promedio de las calderas bagaceras tradicionales entre 65% y 85%, éstas cambian radicalmente bajo criterios de segunda ley como el método exergético, que define a la eficiencia exergética como el parámetro que mide la verdadera perfección termodinámica de los procesos y cuyos valores tradicionales según varios autores [2, 3, 4, 5] oscilan entre 19 y 26%.

Lozano [6] desarrolla una metodología novedosa para el análisis exergético de calderas de vapor instaladas en plantas de potencia, se aprecia muy bien cómo cambia radicalmente el comportamiento termodinámico de estos equipos en comparación con los análisis de primera ley. Sin embargo es necesario aplicar este tipo de metodologías aplicadas a las particularidades de las calderas utilizadas por la industria azucarera.

El presente trabajo se basa en la metodología propuesta por Lozano y Valero [7] para el análisis de calderas que queman carbón. Se toma en cuenta las particularidades de una caldera bagacera. Se utilizan los modelos convencionales para el cálculo de los balances de masa y energía, además de aplicarse novedosamente el método exergético, y así obtener las pérdidas separadas e irreversibilidades.

## MÉTODO

La Fig. 1 muestra los principales subsistemas de la caldera bagacera y la interconexión de los flujos de aire, agua, vapor, bagazo, cenizas, y gases de combustión. Este nivel de agregación permite aplicar adecuadamente los balances de masa, energía y exergía y puede ser aplicado con ligeras variaciones a cualquier tipo de caldera bagacera.

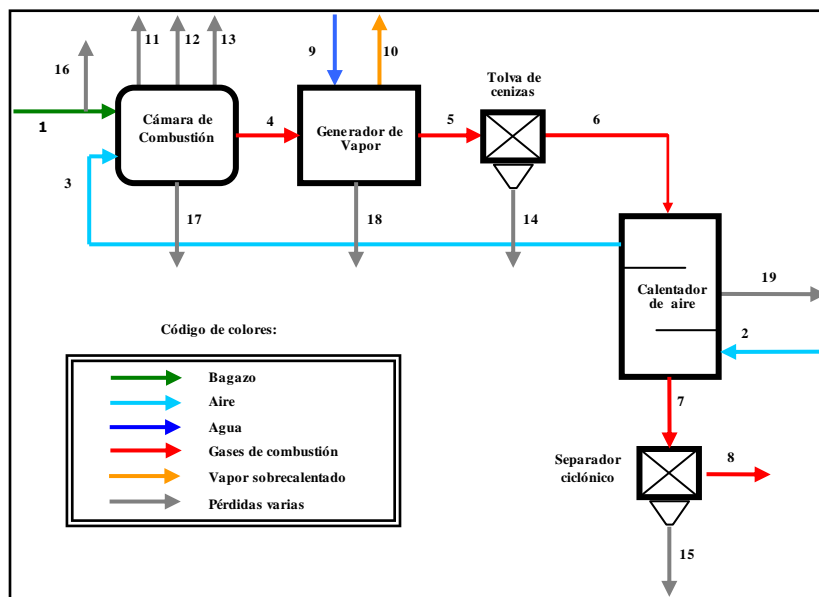


Fig. 1 Representación esquemática de caldera bagacera

La tabla 1 muestra el código de los diversos flujos dentro de la caldera con su respectiva descripción, los parámetros y puertos de medición, y las pérdidas de energía y exergía asociadas a cada flujo. Los flujos de cenizas volantes en 4', 5', 6', 7' y 8' están asociados a los flujos de gases de combustión. Los flujos 18 al 20 representan las irreversibilidades asociadas al proceso de combustión en el horno, y a la transferencia de calor en el generador de vapor y calentador de aire.

Tabla 1 Flujos, mediciones y pérdidas a calcular

Flujo	Denominación	Medidas en prueba de rendimiento	Pérdidas de energía	Pérdidas de exergía
0	Aire atmosférico	Presión: $P_0$ (atm); temperatura $t_0$ (C) Punto de rocío: $t^*$ (C)		
1	Bagazo	Temperatura: $t_1$ (C), análisis elemental		
2	Aire entrada CA	Temperatura: $t_2$ (C)		
3	Aire entrada CC			
4	Gases entrada GV			
4'	Cenizas volantes I	Sólidos no quemados: $U_1$ (g/kg) Fracción: $\alpha_1$		
5	Gases entrada tolvas			
5'	Cenizas volantes I			
6	Gases entrada CA	Temperatura: $t_6$ (C)		
6'	Cenizas volantes II	Fracción: $\alpha_2$	LH <sub>d1</sub>	LB <sub>d1</sub>
7	Gases entrada ciclones			
7'	Cenizas volantes II		LH <sub>d2</sub>	LB <sub>d2</sub>
8	Gases de chimenea	Temperatura: $t_7$ (C); análisis de gases	LH <sub>h</sub>	LB <sub>h</sub>
8'	Cenizas volantes III	Fracción: $\alpha_3$	LH <sub>d3</sub>	LB <sub>d3</sub>
9	Agua entrada GV	Presión: $P_9$ (kg/cm <sup>2</sup> ); temp.: $t_9$ (C)		
10	Vapor sobrecalentado	Presión: $P_{10}$ (kg/cm <sup>2</sup> ); temp.: $t_{10}$ (C) Caudal: $m_{10}$ (kg/h)		
11	Carbono no quemado		LH <sub>UC</sub>	LB <sub>UC</sub>
12	Calor al exterior		LH <sub>B</sub>	LB <sub>B</sub>
13	Cenizas retiradas CC	Carbono no quemado: $U_2$ (g/kg) Fracción: $1-\alpha_1$	LH <sub>E1</sub>	LB <sub>E1</sub>
14	Cenizas retiradas tolvas	Fracción: $1-\alpha_2$	LH <sub>E2</sub>	LB <sub>E2</sub>
15	Cenizas retiradas ciclones	Fracción: $1-\alpha_3$	LH <sub>E3</sub>	LB <sub>E3</sub>
16	Pérdidas incontroladas		LH <sub>U</sub>	LB <sub>U</sub>
17	Cámara de combustión (CC)			LB <sub>C</sub>
18	Generador de Vapor (GV)			LB <sub>TGV</sub>
19	Calentador de aire (CA)			LB <sub>TCA</sub>

### Balance de masa y energía

Se decide no incluir los balances de masa y energía en el presente trabajo debido a que son métodos bastante comunes y no aportarían información novedosa. Esto aunado a limitaciones de espacio.

### Balance de exergía

Las ecuaciones 1 a 4 definen la composición del aire atmosférico de referencia.

$$X_{H_2O,0} = P_{v,H_2O}(T_0)/P_0 ; X_{N_2,0} = 0.7898(1 - X_{H_2O,0}) ; X_{O_2,0} = 0.2099(1 - X_{H_2O,0}) ; X_{CO_2,0} = 0.7898(1 - X_{H_2O,0}) \quad (1,2,3,4)$$

Donde  $P_{v,H_2O}(T_0)$  es la presión de vapor de agua a la temperatura de bulbo seco del aire atmosférico.

Las exergías de las sustancias gaseosas en el ambiente de referencia se obtienen de bases de datos confiables.

Para la composición dada por el balance de masa se obtiene la exergía de los flujos de aire de forma similar al cálculo de exergía de gases considerándolos con comportamiento de gas ideal.

La exergía total del bagazo se expresa en cal/mol carbono mediante 5.

$$b_{bag} = - \left[ \Delta H_R^0 - T_0 \Delta S_R^0 + \Delta C_{PR}^0 (T_0 - T^0) - \Delta C_{PI}^0 T_0 \ln \frac{T_0}{T^0} \right] + RT_0 \ln \frac{(X_{O_2,0} P_0)^{v_{O_2}}}{(X_{CO_2,0} P_0)^{v_{CO_2}} (X_{N_2,0} P_0)^{v_{N_2}}} + \int_{T_0}^{T^*} C_c(T) \left( 1 - \frac{T_0}{T} \right) dT \quad (5)$$

$$\text{Donde:} \quad \Delta H_R^0 = - \frac{PCS}{NC} - 81068s \quad (6)$$

$$\Delta S_R^0 = 51.06v_{CO_2} + 45.77v_{N_2} + 16.72v_{H_2O} + 25.16s - 49v_{O_2} - S_{bag}^0 \quad (7)$$

$$\Delta C_{PR}^0 = 8.87v_{CO_2} + 6.69v_{N_2} + 18v_{H_2O} - 29.43s - 7.02v_{O_2} - C_x \quad (8)$$

Asimismo:

$$v_{H_2O} = \frac{h}{2} - 2s \quad ; \quad v_{O_2} = 1 + \frac{h}{4} - \frac{O}{2} + \frac{3}{2}s \quad ; \quad v_{CO_2} = 1 + s \quad ; \quad v_{N_2} = \frac{n}{2} \quad (9,10,11,12)$$

$$S_{bag}^0 = 8.88272 - 7.52311 e^{-0.564682\left(\frac{h}{1+n}\right)} + 4.80748\left(\frac{o}{1+n}\right) + 12.9807\left(\frac{n}{1+n}\right) + 10.6767\left(\frac{s}{1+n}\right) \quad (13)$$

$R$  es la constante universal de los gases en cal/mol K.

La exergía del bagazo expresada en cal/kg bagazo se determina por:

$$B_{bag} = b_{bag} NC \quad (14)$$

Para el cálculo de la exergía de las cenizas en cal/g se utiliza la siguiente expresión:

$$b_z(t) = \int_0^t C_{P,z}(t) \left(1 - \frac{T_0}{t + 273.15}\right) dt \quad (15)$$

La exergía del carbono no quemado se calcula en cal/mol carbono por 16.

$$b_v = 94052 + 0.7T_0 + 0.29(T_0 - T^0 - T_0 \ln \frac{T_0}{T^0}) + RT_0 \ln \frac{X_{O_2,0}}{X_{CO_2,0}} \quad (16)$$

Se utilizarán tablas de vapor convencionales o programas de computadora o gráficos para obtener las exergías de los flujos de agua y vapor a partir de la presión y la temperatura en kcal/kg bagazo.

$$b_w(t, P) = h(t, P) - h(t_0, P_0) - T_0 [s(t, P) - s(t_0, P_0)] \quad (17)$$

La exergía de los gases en cal/mol se obtiene por la ecuación 18.

$$b_g(T, P) = \sum y_i b_{g,i}(T, P) \quad (18)$$

La exergía de cada componente gaseoso esta formada por tres partes: la térmica asociada a la temperatura, la mecánica asociada a la presión y la química asociada a la reactividad de las sustancias.

$$b_{g,i} = (b_{g,i})_T + (b_{g,i})_P + (b_{g,i})_Q \quad (19)$$

La contribución exergética de cada componente a la exergía térmica se obtiene por:

$$(b_{g,i})_T = (A_i - T_0 B_i)(T - T_0) + (B_i - T_0 C_i) \frac{(T^2 - T_0^2)}{2} + (C_i - T_0 D_i) \frac{(T^3 - T_0^3)}{3} + D_i \frac{(T^4 - T_0^4)}{4} - A_i T_0 \ln \frac{T}{T_0} \quad (20)$$

La contribución exergética de cada componente a la exergía mecánica se obtiene por:

$$(b_{g,i})_P = RT_0 \ln \frac{P}{P_0} \quad (21)$$

La exergía química de la corriente gaseosa se calcula por:

$$(b_{g,T})_Q = \sum y_i b_{i,0} + RT_0 \sum y_i \ln y_i \quad (22)$$

Donde  $b_{i,0}$  es la exergía química estándar de referencia en cal/mol de cada componente gaseosa.

Una vez que se determinan los flujos exergía de los estados medidos, se aplica el método exergético para hallar la irreversibilidad debida a la transferencia de calor en el generador de vapor en kcal/kg bagazo mediante:

$$LB_{TG} = m_{10} [b_w \text{ en } 9, P_9] - b_w \text{ en } 10, P_{10}] + \sum [b_{g,i} \text{ en } 4, P_4] - b_{g,i} \text{ en } 5, P_5] + CV_4 [b_z \text{ en } 5] \quad (23)$$

De igual forma se obtiene la irreversibilidad originada por la transferencia de calor en el calentador de aire.

$$LB_{TCA} = \sum [b_{ah} \text{ en } 2, P_2] - \sum [b_{hh} \text{ en } 6, P_6] + CV_6 [b_z \text{ en } 6] - \sum [b_{ah} \text{ en } 3, P_3] - \sum [b_{hh} \text{ en } 7, P_7] + CV_7 [b_z \text{ en } 7] \quad (24)$$

La irreversibilidad producida por el proceso de combustión en el horno de la caldera se obtiene mediante 100.

$$LB_C = B_{bag} + \sum [b_{ah} \text{ en } 3, P_3] - E_{13} b_z \text{ en } 3] - NC v h_v - \sum [b_{g,i} \text{ en } 4, P_4] - CV_4 h_z \text{ en } 4] - B_\beta - B_u \quad (25)$$

Donde  $B_\beta$  y  $B_u$  son las pérdidas exergéticas por transferencia de calor al medio e incontroladas.

### Rendimiento exergético de la caldera (método directo)

El balance de exergía de toda la caldera se expresa como:

$$B_{bag} = m_{10} (b_{10} - b_9) + \sum \text{Pérdidas} \quad (26)$$

El rendimiento exergético de la caldera se calcula globalmente por 27.

$$\eta_{exerg}(\%) = \frac{m_{10} (b_{10} - b_9)}{B_{bag}} \cdot 100 \quad (27)$$

Al igual que el diagnóstico energético, los resultados de este método solo proporcionan una visión general del comportamiento del sistema, por lo tanto es necesario hacer un estudio interno más detallado.

### Rendimiento exergético de la caldera (método por pérdidas separadas)

Los mismos datos utilizados en el análisis energético, servirán para hallar las pérdidas exergéticas en cada subsistema de la caldera.

Pérdidas de energía en humos ( $LB_h$ ):

$$LB_h = \sum_{i=1}^n V_{hh,i} b_{g,i} - \sum_{i=1}^n V_{ah,i} b_{g,i} \quad (28)$$

Pérdidas de energía en cenizas volantes ( $LB_d$ )

$$LB_d = CV_8 b_z \quad (29)$$

Pérdidas de energía en cenizas retiradas ( $LB_e$ ):

- Carbono no quemado  $LH_{UC} = NC v h_v \quad (30)$

- Calor sensible en cenizas retiradas  $LB_E = E_i h_z \quad (31)$

Donde  $i$  son los flujos de cenizas retiradas en los puntos 13,14 y 15.

Subtotal:

$$LB_e = LB_{UC} + LB_E \quad (32)$$

Pérdidas de calor al exterior ( $LB_\beta$ ):

El flujo de exergía asociado a la transferencia de calor por conducción y radiación al ambiente se define por:

$$b_q = q \left( 1 - \frac{T_0}{T} \right) \quad (33)$$

Donde  $q$  es la transferencia de calor. Entonces la pérdida de exergía se calcula por:

$$LB_\beta = LH_\beta \left( 1 - \frac{T_0}{T} \right) \quad (34)$$

$T$  puede considerarse como la temperatura interna del horno o la temperatura de las paredes de la caldera, aunque determinarlas podría convertirse en una tarea complicada. Para simplificar esta tarea se puede utilizar la ecuación 35, con la cual los resultados finales no se ven afectados significativamente.

$$LB_\beta = 0.1 LH_\beta \quad (35)$$

Pérdidas incontroladas ( $LB_U$ ):

Se considera que las pérdidas exergéticas incontroladas son iguales a las energéticas, es decir:

$$LB_U = LH_U \quad (36)$$

Eficiencia exergética:

$$\eta_{exerg} = \frac{B_{bag} - \sum \text{Pérdidas}}{B_{bag}} 100 \quad \text{ó} \quad \eta_{exerg} = 100 - \sum \text{pérdida}(\%) \quad (37,38)$$

Las pérdidas de exergía expresadas en kcal/kg bagazo de cada uno de los departamentos se expresan por:

$$\% LB_i = \frac{LB_i}{B_{bag}} 100 \quad (39)$$

## MEDICIONES

El equipo en análisis es una caldera Babcock & Wilcox que actualmente sólo opera con bagazo. Su capacidad nominal es de 3 248 caballos caldera. El horno es del tipo ward, al cual se le suministra aire caliente lateralmente y por abajo mediante una placa con rejillas. Recientemente se le instaló un calentador de aire. Con el incremento de la presión de operación de la caldera y la introducción de un sobrecalentador se mejoraron las características del vapor vivo producido. Se cuenta con ventiladores de tiro forzado e inducido.

Se monitoreó la caldera durante los meses de noviembre del 2005 a febrero del 2006, lo cual garantiza una descripción del comportamiento de la caldera durante su completa operación que es de noviembre a mayo. Se eliminaron aquellos datos atípicos asociados a la irregular operación de la caldera, es decir, debido a paros parciales o totales imprevistos o programados.

Uno de los principales indicadores que definen la operación de la caldera es la producción de vapor. Se realiza un breve estudio exploratorio de los datos obtenidos y se determinan su estadística descriptiva. Se destaca principalmente la media con un valor de 79.99 klb/h, una varianza de 98.44, una desviación estándar de 9.92, un valor máximo y mínimo de 19.49 y 105.06 respectivamente y un error estándar de 0.17.

Se realizaron mediciones principalmente con instrumentos calibrados y confiables proporcionada por personal técnico del departamento de instrumentación del Ingenio. Los indicadores atmosféricos fueron obtenidos de las bases de datos de las estaciones meteorológicas automáticas del Sistema Meteorológico Nacional y mediante interpolaciones se calcularon las propiedades para la localidad, Ver. La tabla 2 muestra los resultados de las mediciones realizadas en la caldera bagacera N° 2.

Tabla 2. Parámetros medidos en Caldera Bagacera N°2. Ingenio Mahuixtlán

Dato	Parámetro	Magnitud	Unidades
1	Presión atmosférica	90.6	kPa
2	Temperatura atmosférica de bulbo seco	19	°C
3	Humedad relativa atmosférica	76	%
4	Flujo de bagazo	5	kg/s
5	Temperatura de bagazo de alimentación	45	°C
6	Humedad de bagazo	47	%
7	Temperatura de agua de alimentación	120	°C
8	Flujo de agua de alimentación	36 320	kg/h
9	Flujo de aire	15.2	kg/s
10	Vapor producido	36 320	kg/h
11	Presión de vapor vivo	1 275.6	kPa
12	Temperatura de vapor vivo	255	°C
13	Temperatura de aire frío	19	°C
14	Temperatura de aire caliente	202	°C
15	Temperatura de combustión	950	°C
16	Flujo de gases	20.13	kg/s
17	Temperatura de gases (salida de caldera)	251	°C
18	Temperatura de gases de chimenea	195	°C
19	Flujo de cenizas (ceniceros)	66.7	kg/h
20	Flujo de cenizas (tolvas)	5.8	kg/h
21	Flujo de cenizas (ciclones)	8.2	kg/h
22-24	Temp. de cenizas (cenicero, tolvas ciclones)	700; 400; 150	°C
25-27	CO <sub>2</sub> , CO, O <sub>2</sub> (análisis de gases)	14.01; 0.0873; 3.39	%

## RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En la tabla 3 se muestran los parámetros atmosféricos del lugar donde se realizó el estudio.

Tabla 3 Ambiente atmosférico

Parámetro	Valor
Presión (atm)	0.8941
Temperatura (°C)	19
Temperatura de rocío (°C)	14.5
Temperatura de bulbo húmedo (°C)	16.1
Humedad relativa (%)	76
Humedad absoluta (mol H <sub>2</sub> O/mol aire seco)	0.0185
Presión de vapor (atm)	0.0163
Temperatura de aire, entrada instalación (°C)	19

La tabla 4 muestra la composición volumétrica del aire utilizado para la combustión de la caldera bagacera, considerando la humedad del ambiente. Aunque es pequeño dicho parámetro en comparación con los otros componentes se tomará en cuenta su influencia en análisis de pérdidas energéticas y energéticas.

La tabla 5 presenta la composición de los gases a utilizarse en el ambiente estable de referencia, lo cual es útil para el cálculo de las exergías.

Tabla 4 Composición del aire atmosférico

Componente	% volumen
Nitrógeno	77.57
Oxígeno	20.61
Bióxido de carbono	0.00
Vapor de agua	1.82
Monóxido de carbono	0.00
Bióxido de azufre	0.00

Tabla 5. Composición gaseosa en ambiente estable de referencia

Componente	% volumen
Nitrógeno	77.07
Oxígeno	20.48
Bióxido de carbono	0.03
Vapor de agua	2.42

En la tabla 6 se desglosan los niveles de energía y exergía estándar de los gases en el estado de referencia.

Tabla 6. Energía y exergía de gases en ambiente estable de referencia

Componente	ho (cal/mol)	bo (cal/mol)
Nitrógeno	0	182
Oxígeno	0	937
Bióxido de carbono	0	4670
Vapor de agua	10 561	2378
Monóxido de carbono	67 149	65 889
Bióxido de azufre	0	73 188

Se presenta en la tabla 7 la composición elemental del bagazo, en base masa seca, húmeda y base molar.

Aunque se cuenta con un secador de bagazo de contacto directo y flujo cruzado, se observa un alto contenido de humedad en el combustible, lo cual en parte se debe a la falta de ajuste en el tandem de molinos.

Tabla 7. Composición de bagazo procesado

Elemento	Peso molecular (g/mol)	Seco kg/kg bagazo	húmedo kg/kg bagazo	mol/mol carbono
Carbono	12.011	0.470	0.2491	1.0000
Hidrógeno	1.007	0.065	0.0345	1.6495
Oxígeno	16.000	0.44	0.2332	0.7028
Nitrógeno	18.016	0.00	0.0000	0.0000
Azufre	14.08	0.00	0.0000	0.0000
Humedad	32.064	0.00	0.4700	1.2579
Cenizas *	-	0.025	0.0133	0.6389

Temperatura (°C): 45

Peso fórmula (g/mol carbono): 48.2176

NC relación molar (mol carbono/kg bagazo): 20.7393

Aire teórico (mol aire seco/mol carbono): 5.0548

Aire teórico (kg aire seco/kg bagazo): 3.04

\* g/mol carbono

De la misma tabla se observa el bajo aire teórico necesario para la combustión.

La tabla 8 indica el nivel energético y exergético del bagazo. Su relación energía/exergía es de 1.04, lo cual está dentro del rango normal para biomasa.

Tabla 8. Energía y exergía de bagazo

Parámetro	(kcal/kg bagazo)	(cal/mol carbono)
Potencia Calorífica superior (PCS)	2 213.68	106 738
Potencia Calorífica inferior (PCI)	2 143.72	103 365
Energía	2 220.92	107 088
Exergía	2 313.23	111 539

Consumo de bagazo (kg/h): 18 000

La tabla 9 muestra los porcentajes de cenizas volantes en los diversos puntos de referencia del tracto convectivo de la caldera, así como el de carbono no quemado en cenizas volantes y retiradas.

Los valores de cenizas volantes se encuentran dentro de lo normal. Los valores de CNQ fueron determinados a partir de bases de datos.

Tabla 9. Cenizas retiradas, carbono no quemado y cenizas volantes

Parámetro	Valor
Cenizas volantes $\alpha_I, \alpha_{II}, \alpha_{III}$ (%)	72.14; 69.72; 66.29
CNQ en cenizas retiradas $U_1$ (%)	0.10625
CNQ en cenizas volantes $U_2$ (%)	1.4
Contenido de CaO en cenizas (%)	10
Temp. de cenizas en cenicero, tolvas ciclones (°C)	700; 400; 195

La tabla 10 especifica los flujos, energía y exergía de cenizas volantes, cenizas retiradas y carbono no quemado. Se observa que el nivel de energía del CNQ es alto en comparación con las otras corrientes, pero su influencia en el comportamiento del sistema es pequeña debido a reducido flujo.

Tabla 10. Flujos, energía y exergía de cenizas y carbono no quemado

Parámetro	Flujo (kg cz/kg bagazo)	Energía (kcal/kg cz)	Exergía (kcal/kg cz)
Cenizas retiradas			
Horno	3.7535	137.23	66.08
Tolvas	0.3207	74.19	26.63
Ciclones	0.4544	32.61	7.02
Cenizas volantes			
I	9.5585	203.62	114.05
II	9.2379	43.70	11.46
III	8.7834	32.60	7.02

Carbono no quemado

Flujo (kg CNQ/kg cz; kg CNQ/kg bag; mol CNQ/mol C):  $4.6669 \times 10^{-3}$ ;  $6.2126 \times 10^{-5}$ ;  $2.4940 \times 10^{-4}$

Energía (kcal/kg CNQ): 7830.34

Exergía (kcal/kg CNQ): 8147.08

Los componentes más influyentes dentro de la mezcla se gases de combustión son el N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O y CO<sub>2</sub> como se observa en la tabla 11. El H<sub>2</sub>O propicia una elevada pérdida en los gases de chimenea. La cantidad de CO<sub>2</sub> producido se encuentra dentro de valores tradicionales. Se observa también que el exceso de aire está dentro del rango típico.

Tabla 11. Gases de combustión

Componente	mol <sub>gas</sub> /mol <sub>carbono</sub>	% volumen
Nitrógeno	5.6490	60.72
Oxígeno	0.4430	4.76
Bióxido de carbono	0.9936	10.68
Vapor de agua	2.2152	23.81
Monóxido de carbono	0.0062	0.07
Bióxido de azufre	0.0000	0.00
Mezcla gaseosa seca	7.0917	76.24
Mezcla gaseosa húmeda	9.3039	100

Temperatura gases entrada CA (C): 322

Temperatura de gases salida CA (C): 195

Exceso de aire en combustión (%): 41.44

Infiltración de aire en CA (%): 0.00

En la tabla 12 se observan los flujos y niveles de energía y exergía de los flujos de aire y gases de combustión.

La temperatura del horno alcanza un valor de 1 012 °C, lo cual es normal para una caldera que utiliza el quemado en pila. La temperatura de los gases de salida es de 195 °C, lo cual da un margen aceptable de recuperación de calor mediante el uso de superficies de cola.

Tabla 12 Energía y exergía de flujos aire y gas

Parámetro	Flujo (mol/kg bag)	T (C)	h (cal/mol)	b (cal/mol)
Aire de entrada a CA (2)	151.03	19	192	1
Aire de entrada a CC (3)	151.03	202	1 487	291
Gases de entrada a GV (4)	192.96	1 012	11 016	5 539
Gases de entrada a tolva (5)	192.96	322	4 928	1 415
Gases de entrada a CA (6)	192.96	322	4 928	1 415
Gases de entrada a ciclones (7)	192.96	195	3 912	960
Gases de chimenea (8)	192.96	195	3 912	960

Los valores de energía y exergía para el agua y vapor de agua fueron obtenidos mediante un programa computacional a partir de la presión y temperatura. Los resultados se muestran en la tabla 13. El índice de generación es típico del tipo de calderas en análisis.



Tabla 13 Energía y exergía de flujos agua vapor

Parámetro	Flujo (kg/kg bag)	P (atm)	T (C)	h (kcal/kg)	b (kcal/kg)
Aire de entrada a (9)	2.02	12.59	120	120.50	14.29
Vapor producido (10)	2.02	12.59	255	703.56	225.50

Producción de vapor (kg/h): 36 620

#### Pérdidas de energía (diagnóstico energético)

Las pérdidas más significativas dentro del diagnóstico energético como lo muestra la tabla 14 son en los gases de chimenea, cuyo valor alcanza 32.7%, de los cuales se destacan las pérdidas provocadas por la alta humedad del bagazo con 14.10%, las debidas a la formación de humedad por la presencia del hidrógeno en el bagazo con 9.3% y las debidas al calor sensible de los gases secos de chimenea con 8.8%. Las pérdidas debidas a la humedad del aire y a la presencia de CO de carbono en los gases de combustión son de baja influencia debido a su bajo valor (0.57%).

Las pérdidas originadas por las cenizas retiradas, volantes emitidas junto con los gases de chimenea y el carbono no quemado son pequeñas, todas ellas apenas suman el 0.08%.

Las pérdidas por transferencia de calor al medio ambiente se optó por definir su valor de bases de datos cubanas especializadas en calderas bagaceras (2%). Las pérdidas incontroladas que se determinan por balance tienen un valor muy elevado (12.3%) y por lo tanto se debe cuantificar cuales son las causas que las provocan. Las pérdidas totales son de 47%, con una eficiencia de de 53%, lo cual es típico de una caldera de las citadas características.

Tabla 14 Perdidas de energía (método de pérdidas separadas)

Concepto	(kcal/kg bag)	Porcentaje (%)	Agrupación (%)
Gases no quemados (LH <sub>CO</sub> )	8.6	0.39	Pérdidas en gases 32.69
Calor sensible en gases secos (LH <sub>G</sub> )	194.8	8.77	
Humedad del aire (LH <sub>mA</sub> )	4.0	0.18	
Humedad del bagazo (LH <sub>mb</sub> )	313.2	14.10	
Humedad por hidrógeno (LH <sub>H</sub> )	205.3	9.25	
Cenizas volantes (LH <sub>d</sub> )	0.3	0.01	Escorias 0.07
Carbono no quemado (LH <sub>UC</sub> )	0.5	0.02	
Cenizas retiradas (LH <sub>E</sub> )	0.6	0.05	
Calor al exterior (LH <sub>B</sub> )	44.4	2.00	
Incontroladas (LH <sub>U</sub> )	272.5	12.27	
Pérdidas totales	1 044.1	47.01	
Eficiencia	1 176.8	52.99	

Eficiencia por método directo (%): 52.97

#### Pérdidas de exergía (diagnóstico exergético)

El panorama de pérdidas utilizando la segunda ley de la termodinámica cambia radicalmente en comparación del método energético, tal y como lo muestra la tabla 15. Las pérdidas más significativas se originan durante el proceso de combustión en el horno, la irreversibilidad por esta causa es del 43.7% y se debe a la naturaleza misma del proceso; sin embargo es posible reducirla mediante métodos mejores de combustión. La irreversibilidad causada por la transferencia de calor entre los gases calientes y el vapor en formación en la flusería y el sobrecalentador es significativa con 16%; está se puede reducir reduciendo el gradiente de temperatura entre ambos flujos, es decir incrementando la presión de operación de la caldera. Las pérdidas de exergía por calor sensible y latente en la emisión de gases húmedos a alta temperatura al ambiente es también de considerarse con 8%; estas pérdidas pueden reducirse rentablemente utilizando superficies recuperadoras de calor como economizadores, calentadores de aire y secadores de bagazo. Aunque pequeña, la irreversibilidad por transferencia de calor entre el flujo de gases y aire en el calentador de aire debe tomarse en cuenta, 1.9%; la cual se puede aminorar mediante el incremento del área de transferencia de calor con la finalidad de reducir la diferencia de temperatura media logarítmica del equipo.

Tabla 15 Perdidas de exergía (método de pérdidas separadas)

Concepto	(kcal/kg bag)	Porcentaje (%)
Gases húmedos (LB <sub>h</sub> )	185.1	8.00
Cenizas volantes (LB <sub>d</sub> )	0.1	0.00
Carbono no quemado (LB <sub>UC</sub> )	0.5	0.02
Cenizas retiradas (LB <sub>E</sub> )	0.3	0.01
Calor al exterior (LB <sub>B</sub> )	4.4	0.19
Incontroladas (LB <sub>U</sub> )	272.5	11.78
Irreversibilidad transferencia de calor CA (LB <sub>TCA</sub> )	44.0	1.90

Irreversibilidad transferencia de calor GV ( $LB_{TGV}$ )	370.5	16.02
Irreversibilidad por combustión CC ( $LB_C$ )	1 009.8	43.65
Pérdidas totales	1 887.1	81.58
Rendimiento exérgico	426.1	18.42

Eficiencia energética por método directo (%): 18.42

Las pérdidas de exergía por cenizas volantes emitidas junto con los gases de chimenea, por carbono no quemado, por cenizas retiradas y por transferencia de calor al medio apenas suman entre todas 0.2%, es decir, pueden despreciarse. Es necesario realizar un análisis detallado para hallar en origen de las pérdidas incontroladas con 11.8%, que muy posiblemente se deban principalmente al bagazo no quemado.

Las pérdidas de exergía totales arrojan 81.6%, es decir, una eficiencia energética de 18.4%. Esta eficiencia se halla dentro del límite inferior de las bases de datos especializadas en calderas bagaceras.

## CONCLUSIONES.

1. Las principales pérdidas dentro del diagnóstico energético se registran en los gases de combustión emitidos al medio ambiente, que para el caso particular de la caldera bagacera en estudio ascienden a 32.7% de la energía total al bagazo, lo cual inicialmente pudiera llevar a los diseñadores a tratar de reducir el contenido de humedad en el bagazo, el contenido de hidrógeno en el bagazo o la temperatura de emisión de los gases de chimenea.. Es un hecho que las pérdidas incontroladas con 12.3% están muy por arriba de lo convencional, por lo que es necesario atender dentro de la metodología desarrollada las causas que generan estas altas pérdidas.

2. El diagnóstico energético presenta una visión parcial del verdadero comportamiento de la operación de la caldera, por lo que es necesario realizar un diagnóstico exérgico si se quieren atender las verdaderas causas que generan las pérdidas y de esta manera incrementar la eficiencia de estos equipos.

3. El diagnóstico exérgico arroja que las principales irreversibilidades son originadas en la cámara de combustión con 43.7% del contenido exérgico total del bagazo. Se recomienda valorar la opción de mejorar el proceso de combustión ya sea utilizando el quemado en capas o lecho fluidizado, aunque esto requiere de cambios radicales en el diseño del horno de la caldera. La irreversibilidad debida a la transferencia de calor entre los gases calientes y las superficies evaporativas es de 16% y la forma de reducirlas es incrementando la presión de operación de la caldera con la finalidad de reducir el gradiente de temperatura, lo cual también implica inversiones significativas. Las pérdidas por emisión de gases de chimenea al medio de 8% se pueden reducir mediante la utilización de equipos de recuperación de calor. Las irreversibilidades en el calentador de aire se reducen mediante el incremento de la superficie de transferencia de calor. Al igual que el análisis energético es necesario realizar un estudio profundo de las causas que generan las pérdidas incontroladas.

4. Para realizar cualquier mejora modificación en la caldera con la finalidad de reducir las pérdidas parciales y aumentar la eficiencia global es necesario utilizar la termoeconomía. Desde hace ya varias décadas se han realizado propuestas termoeconómicas cuya finalidad entre otras cosas es definir hasta donde es económicamente rentable incrementar el perfeccionamiento termodinámico de los equipos, es decir, optimizarlos.

## REFERENCIAS

1. A.J. Benitez, Método Termoeconómico Aplicado a Nuevas Soluciones Energéticas para la Industria Azucarera, Tesis Doctoral, Facultad de Mecánica, Universidad de Matanzas, Matanzas, Cuba, 2000.
2. E.R. Barreda del Campo, A.G. Cerqueira and S.A. Nebra, Thermoeconomic Analysis of a Cuban Sugar Cane Mill, Energy Convers, Mgmt. Vol. 39, No. 16-18, pp. 1773-1780, Elsevier Science, 1998.
3. G. Cárdenas, D.P. De Vázquez y E. Wittwer, Análisis Energético y Exérgico de un Sistema Caldera -Secadero de Bagazo, International Sugar Journal, Vol. 96, Issue 1146, pp. 213-227, Junio 1994.
4. J.J. Marín, Aplicación del Método Exérgico y Tecnología Pinch para Determinar Irreversibilidades en Calderas Bagaceras, Centro Azúcar, N° 3, 2003.
5. S.R. Vertiola and S. Oliveira Jr., Proceedings of ECOS '95, Istanbul, Turquia, pp. 231-236, 1995.
6. M.A. Lozano, Metodología para el análisis exérgico de calderas de vapor en centrales térmicas. Tesis Doctoral. Universidad de Zaragoza, 1987.
7. Valero, A. y Lozano, M.A., Evaluación de los Rendimientos Energético y Exérgico de Calderas de Vapor por Pérdidas Separadas. E.T.S.I.I. Departamento de Termodinámica y Físicoquímica. Universidad de Zaragoza.