

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

FACULTAD DE INGENIERIA QUIMICA

Mon
621.194
S731
2013



Evaluación Tecnológica de las Calderas No. 6, No. 7 y sus equipos periféricos del Ingenio Monte Rosa en el período de Zafra 2011-2012

Trabajo Monográfico Presentado por:

Br. Jason Francisco Soza Jiménez

Para Optar al Título de:

Ingeniero Químico

Tutor:

Dr. Rafael Gamero Paguaga

Asesor:

Ing. Juan Eduardo Contreras

Managua, Nicaragua
Octubre, 2013

CARTA DEL CATEDRÁTICO GUÍA

Dedicatoria

A Dios:

Que me ayuda cada día de mi vida y ha estado en todo momento, más aun en los momentos difíciles, es el principal personaje al que le dedico este trabajo y la realización de mi carrera.

A mi Madre:

Que ha sido padre y madre durante cada año de mi vida, me ha sabido aconsejar y guiar por el buen camino, ha sido el mayor ejemplo de mi vida que aun en momentos difíciles siempre sigue adelante.

A mis Herman@s:

Que siempre han estado a mi lado apoyándome.

A mis Abuelitos:

Porque inculcarle buenos valores a mi madre y ella heredármelos a mí los quiero abuelitos.

A mi novia Kathy Carter:

Porque ha estado cuando más la he necesitado y me ha demostrado su gran amor incondicional hacia mi persona.

Jason Francisco Soza Jiménez

Agradecimiento

Le expreso mi más sincero agradecimiento al *Ing. Manuel Espinoza* por su colaboración al otorgarme el tema para estudio y brindar todo su apoyo mientras se iniciaba la actividad de recolección de datos.

A mi madre *Lic. Justina Jiménez* por apoyarme económica y emocionalmente durante mis inicios hasta el final de mi carrera.

A la familia *Jiménez Ramírez* por ayudarme con el alojamiento y parte de la alimentación durante 4 años de mi carrera.

A la familia *Rostran González* por ayudarme en el alojamiento durante la culminación de mis estudios y más a la Sra. Hilda González por estar cuando más necesitaba la ayuda de una persona en una ciudad que no era la mía.

A mi profesora *Msc. Maritza Sánchez* por ayudarme siempre que necesitaba un consejo o de su apoyo como persona.

A mi tutor el *Dr. Rafael Gamero* por haberme proporcionado parte de su tiempo y por su ayuda indispensable para la realización de mi trabajo monográfico.

A la *Dirección de Bienestar Estudiantil* por la ayuda económica para finalizar la entrega de mi documento.

Y a todas las personas que contribuyeron de una u otra forma en la realización de mi documento monográfico en especial al todo el personal del área de generación de vapor del Ingenio Monte Rosa.

Resumen

El presente trabajo tiene como objetivo la evaluación tecnológica de las calderas No. 6 y No. 7 del Ingenio Monte Rosa, debido a la variación constante de la eficiencia térmica de dichos equipos. Para ello, se realizaron diferentes tipos de mediciones en los parámetros de generación de vapor. Estos parámetros se utilizaron para el análisis del proceso de combustión, cantidad de aire introducido al hogar, gases de combustión y eficiencia térmica del sistema de generación de vapor.

Para cumplir con este objetivo se utilizó la siguiente metodología:

- Diagnostico técnico preliminar, en el cual se revisó como trabajan actualmente los equipos.
- Identificación de parámetros involucrados en el proceso de combustión y generación de vapor.
- Análisis de proceso de combustión.
- Determinación de la cantidad teórica de aire para la combustión.
- Cantidad y contenido de los productos de combustión.
- Balance de materia.
- Balance de energía.

Dentro de la evaluación se encuentran cálculos de cantidad de aire necesarios para una combustión completa y de gases de salida en kilogramos por kilogramo de bagazo, la cual está calculada por componente Nitrógeno, oxígeno, agua y dióxido de carbono.

Se realizaron balances de materia y energía para los calentadores instalados para la cogeneración 2011- 2012, la cual fue la indicada para la operación de los mismos y con los valores partieron como punto de referencia.

Se calculó eficiencia térmica del sistema de generación de vapor para la presenta evaluación durante todos los días de zafra, la cual según los resultados obtenido

se encuentra dentro del rango de operación según el tipo de caldera, en este caso acuotubulares.

Con los resultados del análisis de combustión se observa el comportamiento del porcentaje de exceso de aire, el cual no es controlado adecuadamente versus la eficiencia de combustión, es muy aceptable ya que es la indicada para el combustible según Hugot, (1986), el máximo porcentaje de eficiencia de combustión es de 80%, para la caldera No. 6 es 69% y para la caldera No. 7 es 69%.

Se recomienda mantener la cantidad apropiada de exceso de aire para poder obtener una combustión completa de 40 a 60% según Hugot, (1986), instalar instrumentos capaces de medir cantidad de aire y de gases de combustión, estos instrumentos ayudarán a mejorar su eficiencia en la operación del proceso de generación de vapor.

Alcances y Limitaciones del estudio

Alcance

El presente trabajo incluye cálculos de eficiencia térmica en las calderas No. 6 y No. 7 del Ingenio Monte Rosa, de aire y cantidad de gases en la combustión en kilogramos por kilogramo de bagazo. Este cálculo esta hecho individual para nitrógeno, oxígeno, agua y dióxido de carbono, cálculos de balance de materia y energía en los calentadores instalados en la zafra 2011-2012 para la cogeneración.

Se incluyen datos de temperatura de vapor, presión del domo, generación de vapor, bagazo quemado por día y temperatura antes y después del economizador, los cuales fueron obtenidos del cuarto de control caldera, lectura directa mediante instrumentación local como: termómetros, manómetros, flujómetros y analizador de gases.

Limitación

Pese a que en el ingenio se toman muy pocas mediciones, lo cual restringe en buena parte los balances de materia, si se lograron realizar aquéllos en base en un exceso de aire versus bagazo calculados en el hogar de la caldera, en cálculos de los calentadores no se profundizo ya que no se contaba con toda la información, la única información es el diagrama de tiempo muerto para el cálculo de temperatura de salida.

No se incluyeron datos de aire introducidos al hogar por el tiro forzado ya que el ingenio no cuenta con esa información, solo poseen un sistema de lazo entre la alimentación y el *damper* del tiro forzado, el cual se abre o se cierra dependiendo de la alimentación al hogar, de igual forma no poseen de cantidad de gases de la

combustión, sin embargo como se mencionó al inicio de esta sección estos datos fueron calculados.

No se realizaron cálculos de costos de operación ya que no fueron solicitados por el ingenio ni constituyen un objetivo propuesto dentro del problema planteado.

INDICE

Descripción	página
CARTA DEL CATEDRÁTICO GUÍA	I
Dedicatoria	II
Agradecimiento	III
Resumen.....	IV
Alcances y limitaciones del estudio	VI
I. Introducción	1
II. Objetivos	3
III. Marco de referencia	4
3.1. Generalidades	4
3.1.1. Clasificación de las calderas	4
3.1.2. Calderas de tubo de humo (Piro tubulares)	5
3.1.3. Calderas de tubos de agua (Acuotubular)	5
3.2.1. Eficiencia de la caldera	9
3.3 Proceso en el hogar de la caldera	9
3.3.1 Combustible	9
3.3.2 Composición física.....	10
3.3.4 Estructura química del bagazo	11
3.3.5 Combustión del bagazo	13
3.3.6 Cálculo del proceso de combustión	15
3.3.7 Humedad del bagazo	18
3.3.8 Poder Calorífico.....	19
3.3.9 Ceniza.....	19
3.4 Generación de vapor.....	19
3.4.1 Medidas para mejorar la eficiencia de una caldera.....	20
3.4.2. Parámetros de las etapas de la producción de vapor sobrecalentado	21
3.4.3. Cálculo del calor suministrado	22
<i>Calor sensible</i>	22
<i>Calor latente</i>	23

<i>Flujo de calor</i>	23
<i>Entalpía</i>	23
3.5 Equipos que comprenden la caldera como un solo equipo	24
3.5.1. Tipos de Hornos	24
3.5.2 Horno de gradilla.....	24
3.5.3 Hogar o Cámara de Combustión.....	25
3.5.4 Chimeneas	26
3.5.5 Sistema de evacuación de gases de chimeneas.....	27
<i>Tiro natural</i>	27
<i>Tiro forzado</i>	29
<i>Tiro inducido</i>	30
3.5.6 Intercambiadores de calor o calentadores.....	31
3.5.7 Sobrecalentadores.....	31
3.5.8 Domo de vapor y de agua	31
3.5.9 Haz tubular	31
3.5.10 Economizador.....	32
3.5.11 Ventajas del economizador	32
3.5.12 Sopladores de hollín.....	32
3.5.13 Purga de fondo.....	33
3.5.14 Desaireador	33
3.5.15 Ventiladores primarios y secundarios.....	33
3.5.16 Calentadores de agua.....	33
3.6 El calentamiento es esencial	33
3.6.1 Golpes de ariete.....	33
3.6.2 Choque (Shock) térmico	34
3.6.3 Arrastres	34
3.7 Balance de materia y energía.....	34
3.7.1. Balance de materia.....	34
3.7.2. Balance de energía.....	36
IV. Metodología.....	39
4.1. Determinar la eficiencia del sistema de generación de vapor.....	39

4.2. Diagnostico técnico preliminar.....	39
4.3. Identificación parámetros involucrados en el proceso de combustión y generación de vapor	40
4.4. Análisis del proceso de combustión	41
4.5. Determinación de cantidad teórica del aire para la combust.....	41
4.6. Cantidad y contenido de los productos de la combustión.....	41
4.7. Balance de materia.....	41
4.8. Balance de energía	42
V. Presentación y discusión de resultados	46
5.1 Influencia de los parámetros de operación en el funcionamiento de las	46
5.1.1 Parámetros principales que influyen en la combustión	46
5.1.2 Parámetros principales para el balance térmico	51
5.2 Análisis del proceso de combustión	53
5.3 Evaluación térmica	59
5.4 Resultados del balance de materia y energía para los calent no.2 y no.3.....	66
VI. Conclusiones.....	69
VII. Recomendaciones.....	71
VIII. Nomenclatura.....	73
IX. Bibliografía.....	75
APENDICE A.....	78
Tablas y figuras que consolidan el marco de referencia y metodología.....	78
APENDICE B.....	84
Datos recolectados directamente desde las instalaciones del ingenio monte rosa zafra 2011 - 2012	84
APENDICE C.....	103
Tablas de resultados obtenidos a partir del cálculo de eficiencia, cálculo de los calentadores, aire requerido para la combustión, cantidad de gases en la combustión y pesos individuales en kilogramos por kilogramo de bagazo.	103
APENDICE D.....	124
Cálculos realizados para obtención de resultados.....	124

LISTA DE TABLAS Y FIGURAS

Tablas	Contenido	Página
3.1	Clasificación de calderas según sus características principales	4
3.2	Composición química del bagazo	11
3.3	Componentes principales del bagazo	11
3.4	Compuestos de la celulosa	11
3.5	Reacciones de la combustión	14
3.6	Propiedades de los productos gaseosos en la combustión	17
3.7	Niveles aceptables de CO ₂ en los combustibles	25
5.1	Desviación estándar del exceso de aire y bagazo quemado de las figs. 5.1 y 5.2.	46
5.2	Desviación estándar del exceso de aire y temperatura de salida de los gases de las figs. 5.3 y 5.4.	49
5.3	Valores promedios de los parámetros principales que influyen en la combustión.	50
5.4	Desviación estándar del bagazo quemado y vapor generado de las figs. 5.5 y 5.6.	52
5.5	Desviación estándar del exceso de aire y la eficiencia de combustión de las figs. 5.7 y 5.8.	54
5.6	Desviación estándar del exceso de aire y la eficiencia de combustión de las figs. 5.9 y 5.10.	56
5.7	Desviación estándar del calor de combustión y la temperatura del aire de las figs. 5.11 y 5.12.	58
5.8	Desviación estándar de la eficiencia térmica y el vapor producido de las figs. 5.13 y 5.14.	60
5.9	Desviación estándar de la eficiencia térmica y bagazo quemado de las	

figs. 5.15 y 5.16.	62
5.10 Desviación estándar del calor de combustión, de vaporización y de la eficiencia térmica de las figs. 5.17 y 5.18.	63
5.11 Resultados del balance de materia y energía calentador No.2	72
5.12 Resultados del balance de materia y energía calentador No.3	72

Figuras	Contenido	Página
3.1	Descripción del proceso de generación de calor	8
3.2	Estructura de la celulosa	12
3.3	Estructura hemicelulosa	12
3.4	Estructura de la lignina	13
3.5	Diagrama PV de la generación de vapor en un proceso isobárico	22
3.6	Ilustración de una cadera acuatubular	25
3.7	Esquema de un ventilador axial	29
3.8	Sistema como se efectúan balances de materia	35
3.9	Calentador #2	37
3.10	Calentador #3	38
4.1	Metodología para calcular la eficiencia térmica de las calderas No. 6 y No. 7 del Ingenio Monte Rosa	43
4.2	Diagrama de bloque para el proceso de combustión	44
4.3	Diagrama de bloque para el cálculo de balance de materia y energía para los calentadores No. 2 y No 3	45
5.1	Comportamiento del porcentaje de exceso de aire vs combustible C6	47
5.2	Comportamiento del porcentaje de exceso de aire vs combustible C7	47
5.3	Comportamiento del porcentaje de exceso de aire vs temperatura de salida de los gases de combustión C6	49

5.4 Comportamiento del porcentaje de exceso de aire vs temperatura de salida de los gases de combustión C7	49
5.5 Comportamiento del bagazo quemado vs vapor generado C6	52
5.6 Comportamiento del bagazo quemado vs vapor generado C7	52
5.7 Comportamiento de porcentaje de exceso de aire vs eficiencia de combustión C6	54
5.8 Comportamiento de porcentaje de exceso de aire vs eficiencia de combustión C7	54
5.9 Comportamiento del calor de combustión vs humedad del bagazo C6	56
5.10 Comportamiento del calor de combustión vs humedad del bagazo C7	56
5.11 Comportamiento del calor de combustión vs temperatura del aire C6	58
5.12 Comportamiento del calor de combustión vs temperatura del aire C7	58
5.13 Comportamiento del porcentaje de la eficiencia térmica vs vapor producido C6	60
5.14 Comportamiento del porcentaje de la eficiencia térmica vs vapor producido C7	60
5.15 Comportamiento de la eficiencia térmica vs el bagazo quemado C6	62
5.16 Comportamiento de la eficiencia térmica vs el bagazo quemado C7	62
5.17 Comportamiento del calor de combustión y del calor de vaporización vs eficiencia térmica de combustión C6	63
5.18 Comportamiento del calor de combustión y del calor de vaporización vs eficiencia térmica de combustión C7	64

5.19 Diagrama de tiempo muerto de los calentadores No. 2 y No. 3 para la
cogeneración 2011-2012

65



Ingenio Monte Rosa, Chinandega

I. Introducción

Una caldera o generador de vapor es un equipo que cumple la función de producir vapor para la generación de energía, tanto mecánica como eléctrica para satisfacer la demanda de procesos tecnológicos, entre ellos los de la industria azucarera. Consta de diferentes elementos destinados a la producción de vapor de agua, los cuales son el hogar o cámara de combustión, el domo, los sobrecalentadores de vapor, el economizador y el calentador de aire. La caldera junto con sus equipos periféricos constituye un solo sistema de producción de vapor.

En Nicaragua, el Ingenio Monte Rosa ubicado en Chinandega, Km. 148.5 Carretera a Potosí, El Viejo, cuenta con 3 calderas acuotubulares para producir vapor de alta presión, temperatura y calidad, de las cuales se evaluaron solo 2 debido a que la tercer caldera solo se ocupa ocasionalmente o si cualquiera de las otras 2 sale de línea para mantenimiento previo, están destinadas para generar energía eléctrica y enviar vapor vivo a la fábrica de azúcar.

La caldera debe trabajar a condiciones específicas dadas por el fabricante, ya que se si se tiene menos producción de vapor, la caldera no se aprovecha al máximo, pero en cambio sí se sobrepasa su capacidad de producción, ella estaría minimizando su tiempo de vida útil corriendo el riesgo de producir fugas u otro tipo de inconveniente.

Las calderas de este ingenio fueron instaladas una a una, a medida que aumentada la demanda de azúcar en Nicaragua y de exportación. La caldera No. 6 se instaló en el año 2000 y la caldera No. 7 en el año 2003, estas 2 calderas son el pilar principal en la producción del ingenio, durante años se le han dado seguimiento del funcionamiento de las mismas, pero nunca se habían hecho un estudio a profundidad.

La fibra de caña, es en general suficiente para que la cantidad de bagazo producida por los molinos se utilice como combustible en los hornos de las calderas y produzca todo el vapor necesario para el movimiento de los motores y en la fabricación de cualquier producto en dicha industria.

La presente evaluación en el área de generación de vapor del ingenio Monte Rosa, tiene como propósito la necesidad de conocer el estado en el cual se encuentran operando sus equipos y su eficiencia total del sistema de generación, ya que presenta muchas variaciones en el mismo, lo cual conlleva a un mayor consumo de energía eléctrica, vapor, agua, combustible (bagazo) y personal para la operación de sus equipos.

II. Objetivos

2.1. Objetivo General:

- Evaluar tecnológicamente las calderas No. 6, No. 7 y equipos periféricos del Ingenio Monte Rosa.

2.2. Objetivos Específicos:

- Identificar los parámetros que influyen en el desempeño del sistema de generación de vapor.
- Analizar el proceso de combustión que ocurre en el hogar de la caldera.
- Determinar la eficiencia térmica del sistema de generación de vapor.

III. Marco de Referencia

3.1. Generalidades

La caldera es un recipiente cerrado en el que se calienta agua para generar vapor, el cual es el transportador de energía primario de todo el proceso azucarero como intercambio de calor en los calentadores, evaporadores, tachos, secadores, centrifugas y clarificadores del proceso de producción de azúcar; y además de aplicación de trabajo mecánico en el tándem de los molinos y adicionalmente en los turbos generadores para producir energía eléctrica. Verlag, (1995). Ver apéndice A Flujograma del proceso azucarero Fig. A1.

3.1.1. Clasificación de las calderas

Las calderas de vapor se clasifican atendiendo a la posición relativa de los gases calientes y del agua, en pirotubulares se llaman también calderas de tubo de fuego y acuotubular tubos de agua (CDEM, 2005).

Tabla 3.1. Clasificación de calderas según sus características principales

Según la disposición de los fluidos	Calderas de tubos de agua (acuotubular)		Calderas de tubos de fuego (pirotubular o igneotubulares)	
Según la disposición del hogar	Calderas de hogar inferior		Calderas de hogar exterior	
Según la circulación de los fluidos	Calderas de circulación natural		Calderas de circulación forzada	
Según la presión de trabajo	De baja presión ($p < 20 \text{ kgf/cm}^2$)	De medio presión ($20 < p < 64$)		De alta presión ($p > 64$)
Por la posición de los tubos	En tubos verticales	En tubos horizontales		En tubos curvados
Por la naturaleza del servicio que prestan	Calderas fijas	Calderas Portátiles	Calderas locomóviles	Calderas marinas

3.1.2. Calderas de tubo de humo (Pirotubulares)

En la caldera de tubos de humo, la llama y los productos de la combustión pasan a través de los tubos y el agua caliente, o cualquier otro medio, rodea el hogar interno y los bancos de tubos. En las calderas de tubos de humo se utilizan varios tipos de hogares (fogones). En la mayoría de los casos, la caldera de tubo de humo incluye un casco para contener agua, así como un espacio para el vapor. Dentro de este casco se encuentran los bancos de tubos (fluxes) y los tubos que forman parte del contenido del recipiente de presión. El hogar de fuego (fogón) proporciona el espacio para el proceso de combustión de la fuente de calor (CDEM, 2005).

3.1.3. Calderas de tubos de agua (Acuotubular):

Las calderas de tubos de agua se presentan en una gran variedad de diseños y configuraciones. En este tipo de calderas, los productos de la combustión rodean los bancos de tubos y el agua circula por el interior de dichos tubos, los cuales tienen una inclinación vertical hacia un recipiente o colector de vapor localizado en el punto más alto de la caldera. Por lo general el tipo de caldera se describe por la configuración de estos tubos, otra configuración de las calderas de tubo de agua describen los diferentes tipos en términos de la variación de la distribución de la cámara de presión (CDEM, 2005).

3.2. Breve descripción del funcionamiento de las calderas del Ingenio Monte Rosa

El ingenio cuenta con 3 calderas acuotubular en total para la generación de vapor, conocidas como calderas No. 5, 6 y 7. De las cuales se avaluaron la No. 6 y 7, ya que la caldera no. 5 solo trabaja ocasionalmente.

El proceso inicia de con una prueba hidrostática, lo cual significa que el domo se llena a su nivel máximo de agua luego se le aplica presión con las bombas a 900 psi para revisar que no hayan fugas en válvulas, tuberías del haz tubular del domo superior e inferior y economizador de la caldera, luego se realiza un calentamiento en el hogar moderadamente subiendo la temperatura y presión para no romper el cemento refractario del hogar, se hace una prueba de vapor en la tubería y luego se eleva la presión para introducirle vapor en ellas con el objetivo de limpiarla, esto se hace unas 6 veces por turbinas con una presión de 700 psi, se revisan los sobrecalentadores primario y secundario, el domo se alimenta con agua previamente tratada desmineralizada con un pH de 9.5 a 11 la cual se almacena en el tanque 260 y es del que se bombea para llenar al tanque deareador, también es alimentado con el vapor agotado del turbo condensing para transferir temperatura al agua que contiene, terminada prueba hidrostática se puede concluir q los equipos están óptimos para la operación de generación de vapor.

Inicia el proceso de generación de vapor aumentando la temperatura y presión del vacío del hogar, temperatura de vapor y presión del domo alimentando la caldera con bagazo del patio para iniciar la combustión, el economizador tiene como función precalentar el agua que entra al domo de la caldera con la temperatura de los gases de salida del hogar, el tiro forzado introduce el comburente (aire) al hogar y el tiro inducido expulsa los humos de la combustión por la chimenea estos parámetros son fundamentalmente para la generar de vapor de calidad saturado y seco, luego se abre la válvula de flujo mínimo, la de calentamiento (manifold) a la línea general de vapor que es la que se dirige a las turbinas y la válvula de pie,

siempre en coordinación con control caldera para estabilizar la presión del domo y de vacío en el hogar, la temperatura del hogar y de vapor. Ya con temperatura de vapor más de 700 °F y de 1100 °F en el hogar se le introduce vapor a la línea para darle tiempo de calentamiento a las turbinas para ponerlos en línea y comenzar a generar energía, luego trabajando los molinos el bagazo expulsado de ellos son transportados por el conductor principal el que transporta el bagazo al interior del hogar de la caldera para que entre a reaccionar en la combustión el cual posee una humedad entre 49 y 51%, si la humedad es superior a 51% el bagazo proporciona problemas en la combustión como caídas en la temperatura y presión del hogar.

En paralelo tienen que estar en línea la estación de ceniza para evitar obstrucción en las tolvas de las calderas y por consiguiente mala combustión en el hogar, ya que la parrilla estará completamente llena de ceniza lo cual puede ocasionar ruptura en el hogar o caídas de presión y temperaturas, la estación de ceniza tiene como función separar el agua de la ceniza a la cual se le aplica un floculante catiónico que hace que la ceniza descienda al fondo de la tolva y separar por decantación, luego el lodo de la ceniza es circulado por el colador para extraer un poco más el agua que lleva el lodo de ceniza y el agua extraída es recirculada a los lavadores de gases de la caldera (Ulloa, 2012 ; METRAL, 2003).

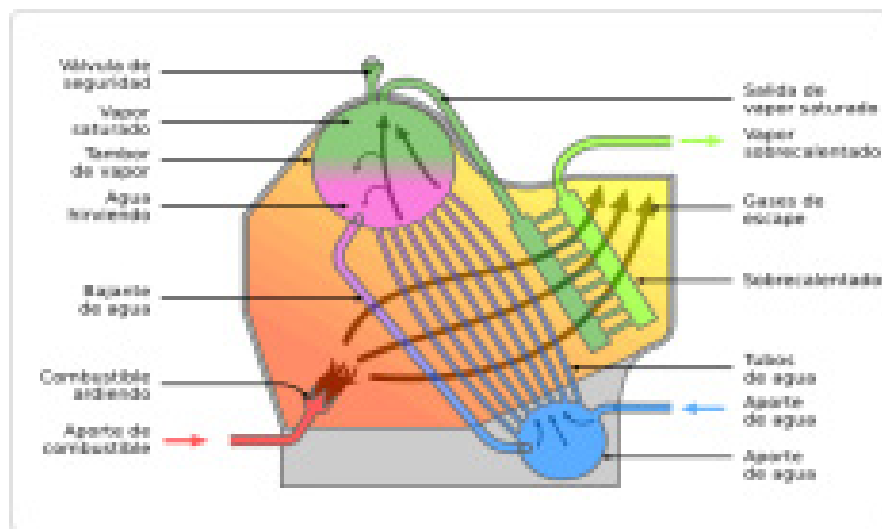


Fig.3.1 Descripción del proceso de generación de vapor

Durante el periodo de zafra 2011- 2012, el vapor producido de las calderas No. 6 y No. 7 es suficiente para abastecer los turbos generadores para la producción de energía eléctrica y luego enviar vapor vivo a la fábrica de azúcar, lo cual solventa el 100% de la energía eléctrica y térmica requerida por el ingenio, y además le permite poder vender cierto porcentaje de energía eléctrica. Con una producción de vapor para la No 6 de 200 klb/h y para la No. 7 de 340 klb/h promedio.

3.2.1. Eficiencia de la caldera

Es la relación entre la cantidad de calor utilizado y la cantidad de calor disponible en la caldera por lo tanto esta relación se describe de esta forma. (Verlag, 1995).

Se puede definir de manera directa:

$$\eta = \frac{Q_{ut}}{Q_{ap}} \quad o \quad \eta = \frac{m_v * (H_v - H_a)}{m_B * PC_B} \quad (3.1)$$

O de manera indirecta en relación del calor aportado y calor perdido.

$$\eta = \frac{Q_{ap} - Q_{pr}}{Q_{ap}} \quad (3.2)$$

H_v : entalpia de vapor, btu/lbm.

H_a : entalpia del agua, btu/lbm.

m_B : masa de bagazo. lbm/dia.

m_v : masa de vapor. lbm/dia.

PC_B : poder calórico del bagazo, btu/lbm.

La eficiencia térmica indica simplemente que fracción de la energía aportada por el combustible llega finalmente al vapor.

3.3 Proceso en el hogar de la caldera

3.3.1 Combustible

El Bagazo

Es el material sólido, fibroso, que sale de la abertura trasera del último de los molinos de la batería, después de la extracción del jugo, es el residuo de la molienda de caña (Hugot, 1986).

3.3.2 Composición física

La composición física del bagazo varía entre límites bastante estrechos. Su propiedad más importante desde el punto de vista de la producción de vapor (humedad), cuando el trabajo de los molinos es deficiente, el contenido de humedad del bagazo será de aproximadamente del 50%, mientras con un buen trabajo su contenido será del 40%.

Además del agua, el bagazo contiene:

- 1) Material insoluble, principalmente celulosa, que constituye la fibra del bagazo.
- 2) Sustancias en solución en el agua consistentes en azúcar e impurezas. Estas sustancias en solución se presentan en pequeñas cantidades que van del 2 al 5%. Si su proporción en peso se designa D%, la fibra será:(Hugot, 1986).

$$F = 100 - w - D \quad (3.3)$$

F = fibra % bagazo

w = humedad del bagazo

$$F = 100 - 50 - 3 = 47\% \text{ fibra} \quad (3.4)$$

3.3.3 Cantidad de bagazo en la caña

Los valores extremos del contenido medio de fibra en la caña se encuentran entre: F=10 – 16% pero por lo general caen entre el 12 y 14%.

La cantidad de bagazo que se obtiene de 100 kg de caña puede calcularse igualando el peso de la fibra que entra a los molinos con el peso que sale:

$$100f = B * F \quad (3.5)$$

f: % fibra del bagazo en caña

$$B = 100f/F \quad (3.6)$$

$B = 100 * 13/47 = 27.65\%$ de bagazo en 100kg de caña, de esta manera se puede saber cuánto bagazo se espera en después de la molienda.

Tabla. 3.2 Composición Química del bagazo (Verlag, 1995).

Composición	%
Carbono (C)	47
Hidrogeno (H)	6.5
Oxigeno (O ₂)	44
Ceniza (ε)	2.5
Total	100

3.3.4 Estructura química del bagazo

Está compuesto en su estructura química por celulosa, hemicelulosa y ligninas. Las proporciones de estos componentes cambian según la variedad de la caña (Cruz, 2008).

Tabla.3.3 Componentes principales de bagazo.

Celulosa	Entre 45 a 55%
Hemicelulosa	Entre 20 a 30%
Ligninas	Entre 15 a 26%

La celulosa se constituye, a su vez, de compuestos alfa, beta y gamma, proporciones habituales de estos componentes en el bagazo.

Tabla.3.4 Compuestos de la celulosa

Alfa celulosa	66% (pueden estar entre 55 a 70%)
Beta celulosa	26% (pueden estar entre 18 a 36%)
Gamma celulosa	8% (pueden estar entre 4 a 11%)

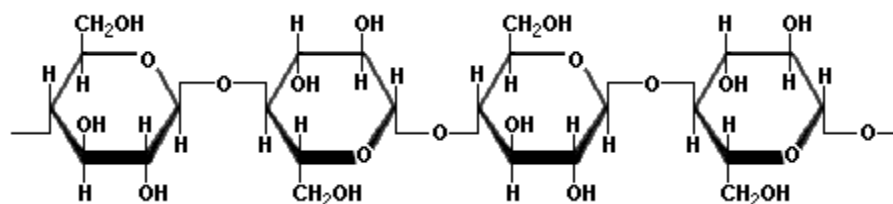


Fig.3.2 Estructura de la celulosa.

Nota: los componentes de las proporciones de la celulosa (α, β, γ) dependen de la variedad de la caña.

Las hemicelulosas están compuestas, fundamentalmente por pentosanos. Se han comprobado que la celulosa es una buena propagadora del fuego y por tanto es favorable para el proceso de la combustión, no obstante sus componentes (α, β, γ) no parecen tener repercusiones significativas en el proceso. También se ha evidenciado que los pentosanos y las ligninas son elementos que retardan el proceso de combustión.

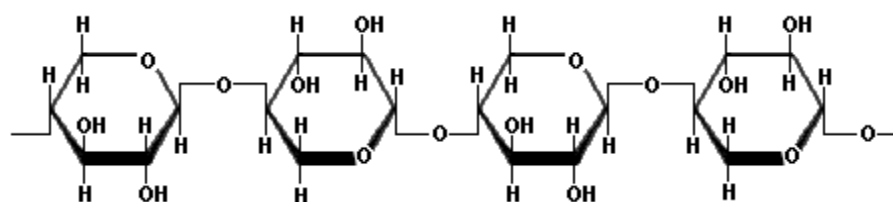


Fig.3.3 Estructura hemicelulosa.

La lignina es un polímero complejo, tridimensional, globular, irregular, insoluble y de alto peso molecular ($>10,000$), formado por unidades defenilpropano cuyos enlaces son relativamente fáciles de hidrolizar por vía química o enzimática. Ésta molécula tiene diferentes tipos de uniones entre unidades aromáticas de fenilpropano.

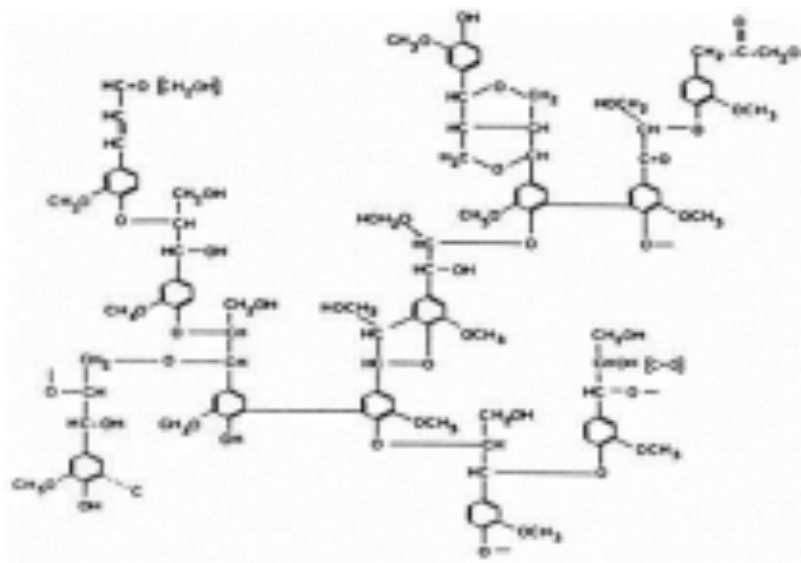


Fig.3.4 Estructura de la lignina.

3.3.5 Combustión del bagazo

El proceso de combustión consiste en quemar combustible en el hogar de la caldera, es el proceso físico – químico que produce la liberación de la energía contenida en el combustible.

Sin presencia de oxígeno no hay combustión, para mantener la combustión es indispensable suministrar aire y evacuar los productos de la combustión. (Danilin, 1999).

- a) **Combustión completa:** ocurre cuando las sustancias combustibles reaccionan hasta el máximo grado posible de oxidación. En este caso no habrá presencia de sustancias combustibles en los productos o humos de la reacción.



- b) **Combustión incompleta:** se produce cuando no se alcanza el grado máximo de oxidación y hay presencia de sustancias combustibles en los gases o humos de la reacción.



- c) **Combustión estequiométrica o teórica:** Es la combustión que se lleva a cabo con la cantidad mínima de aire para que no existan sustancias combustibles en los gases de reacción. En este tipo de combustión no hay presencia de oxígeno en los humos, debido a que este se ha empleado íntegramente en la reacción.

En la tabla 3.5 se presentan las reacciones estequiométricas de combustión, las cuales son (3.7), (3.8), (3.9).

- d) **Combustión con exceso de aire:** Es la reacción que se produce con una cantidad de aire superior al mínimo necesario. Cuando se utiliza un exceso de aire, la combustión tiende a no producir sustancias combustibles en los gases de reacción. En este tipo de combustión es típica la presencia de oxígeno en los gases de combustión. La razón por la cual se utiliza normalmente un exceso de aire es hacer reaccionar completamente el combustible disponible en el proceso.

Tabla 3.5 Reacciones de la combustión (Smith, 1997).

Elemento	Ecuación Química	Pesos Moleculares	Kg de Oxígeno necesario por elemento	Kg de gases producidos por kg de elemento	Gas producido
C	$C_{(s)} + O_{2(g)} \rightarrow CO_{2(g)}$	C 12	$\frac{32}{12} = 8/3$	$\frac{44}{12} = 3.67$	$CO_{2(g)}$
	$2C_{(s)} + O_{2(g)} \rightarrow 2CO_{(g)}$	O ₂ 32	$\frac{32}{24} = 4/3$	$\frac{56}{24} = 7/3$	$CO_{(g)}$
H ₂	$H_{2(g)} + O_{(g)} \rightarrow H_2O_{(l)}$	H ₂ 2 O ₂ 32	$\frac{32}{4} = 8$	$\frac{36}{4} = 9$	$H_2O_{(g)}$

3.3.6 Cálculo del proceso de combustión

Es necesario determinar los siguientes elementos de las reacciones de combustible

1. Cantidad teórica del aire para la combustión.
2. Cantidad del aire real, incluyendo exceso de aire.
3. Cantidad y volumen de los productos de la combustión.

Hugot, (1986) y Pérez, (1982) presentan una serie de ecuaciones utilizadas en el proceso de combustión.

Sabiendo que el aire se compone de 20% oxígeno y 79% de nitrógeno en volumen y en peso 76.85% N₂, 23.15 %O₂.

Por cada kilogramo de bagazo

Volumen de aire seco

$$C = 0.465 \text{ kg} * 2.67 \text{ O}_2 \quad (3.10)$$

$$H_2 = 0.065 \text{ kg} * 8 \text{ O}_2 \quad (3.11)$$

Aire necesario para la combustión por kg de bagazo

$$m_{\text{Aire seco}} = \text{kg O}_2 + \text{kg N}_2 \text{ y luego pasarlo a volumen. (V}_a\text{)} \quad (3.12)$$

Masa de aire húmedo

En este caso se multiplica la cantidad de aire seco por la humedad absoluta para encontrar la masa de agua y luego se suma la masa de aire seco con la masa de agua para obtener el volumen de aire húmedo.

$$m_{agua} = V_a * \omega_{abs} \quad (3.13)$$

$$m_{ah} = m_{as} + m_{agua} \frac{kg_{ah}}{kg_B} \quad (3.14)$$

$$P_g = \text{Peso total de los gases}$$

$$P_g = 5.706 (1 - w) m + 1 \quad (3.15)$$

Cantidad y volumen de los productos de la combustión

Los productos de la combustión pueden determinarse a partir de la composición de los combustibles.

Peso individual de los gases

a) Nitrógeno, N_2

$$N_2 = 4.385 (1 - w) m \quad (3.16)$$

b) Oxígeno, O_2

$$O_2 = 1.321 (1 - w) * (m - 1) \quad (3.17)$$

c) Agua, H_2O

$$H_2O = 0.565 (1 - w) + w \quad (3.18)$$

d) Dióxido de carbono, CO_2

$$CO_2 = 1.72 (1 - w) \quad (3.19)$$

Dónde:

m_{N_2} = masa de nitrógeno presente en los gases de combustión por kg de bagazo (kg/kg B)

m_{O_2} = masa de oxígeno presente en los gases de combustión por kg de bagazo (kg/kg B)

m_{H_2O} = masa de agua presente en los gases de combustión por kg de bagazo (kg/kg B)

m_{CO_2} = masa de Dióxido de carbono presente en los gases de combustión por kg de bagazo (kg/kg B)

w = humedad del bagazo (%)

m = exceso de aire (%)

nota: estos cálculos son en base húmeda del bagazo.

Tabla. 3.6 Propiedades de los productos gaseosos en la combustión (Hugot, 1986).

Composición	Peso molecular gr/mol	p.e en kg/m ³ a 0°/760	v.e en m ³ /kg a 0°/760	Calor específico medio bajo presión constante para el intervalo jmol/°C	
				0-100°C	0-1,000°C
CO ₂	44	1.963	0.509	0.21	0.28
H ₂	18	0.804	1.244	0.48	0.62
N ₂	28	1.252	0.800	0.28	0.26
O ₂	32	1.428	0.700	0.22	0.23
CO	28	1.251	0.80	0.25	0.26
Aire	29	1.293	0.773	0.24	0.25

3.3.7 Humedad del bagazo

El contenido de humedad en el bagazo depende principalmente del ajuste del último molino del tándem y de la cantidad de agua de imbibición; normalmente oscila en un rango de 46 a 51 % en peso total del bagazo.

La humedad debe evaporarse antes que inicie el proceso de combustión en ciertos casos esto no se da, lo que significa que esto influye en las caídas de temperaturas y presión, el vapor resultante de esta humedad puede incluso tender a apagar la combustión. Lo cual significa que los efectos de la humedad sobre la velocidad de la combustión son significativamente perjudiciales en el proceso.

Las propiedades del bagazo como combustibles tienen una gran variabilidad, existiendo bagazos que tienen buenas condiciones y otros con peores. Las principales causa de variabilidad dependen de: (Rubio, 2002).

El contenido de meollo, el contenido de cenizas, el contenido de humedad.

El contenido de ceniza y de humedad están presentes en un porcentaje mayor mientras mayor sea el contenido de meollo, se puede afirmar que las condiciones de bagazo como combustible están directamente asociadas con el contenido de meollo. Mientras más bajo sea el contenido, mayor serán las propiedades del bagazo como combustible.

Las causas que hacen posible el exceso de meollo en el bagazo:

- El bagazo proveniente de cañas que no tienen la suficiente madures.
- El bagazo proveniente de cañas que tienen madurez excesiva.

3.3.8 Poder Calorífico

El poder calorífico (PC) de un combustible es la cantidad de energía desprendida en la reacción de combustión, referida a la unidad empleada de combustible (Kg, Kmol, m³).

De acuerdo a como se expresa el estado del agua en los productos de reacción se puede dividir en: (Danilin, 1999).

- Poder calorífico Superior (PCS)
Expresa la cantidad de calor que se desprende en la reacción completa de la unidad de combustible con el agua de los humos en forma líquida a 0 °C y 1 atm.
- Poder calorífico Inferior (PCI)
Expresa la cantidad de calor que se desprende en la reacción completa de la unidad de combustible con el agua de los humos en estado de vapor.

3.3.9 Ceniza

Es un residuo sólido formado por Al_2O_3 , SiO_2 , CaO , FeO , y Fe_2O_3 . La ceniza además de disminuir la efectividad de la combustión suele depositarse en los quemadores obstruyendo el acceso de aire, por lo cual cada cierto tiempo se debe de dar un soplado de parrilla y soplado de hollín (Pérez, 1982).

3.4 Generación de Vapor

La generación de vapor es una operación mecánica en la cual se quema un combustible (sólido, líquido o gaseoso), con el objetivo de producir calor y obtener la temperatura necesaria para evaporar el agua que se encuentra en el domo de la caldera, esto se hace con el propósito de usar dicho vapor en la producción de azúcar, para evaporar el agua que posee el producto y también ocuparlo en la producción de energía eléctrica, esto con el objetivo de ocuparlo

para consumo de sus equipos eléctricos, o bien venderla ya que producen altos ingresos económicos al ingenio.

Cogeneración

En el Ingenio Monte Rosa se le llama cogeneración al período de reparación, en el cual solo trabaja el área de calderas y de los turbos generadores. El vapor es utilizado para producir únicamente energía eléctrica de consumo y venta, la producción de energía en este período es menor al de zafra, al igual sus condiciones de temperatura y presión del vapor, por lo que entran en línea los calentadores No. 2 y No. 3, cuyo objetivo es aumentar la temperatura del agua de alimentación de las calderas transfiriéndole energía del vapor agotado.

3.4.1 Medidas para mejorar la eficiencia de una caldera

Existen una cantidad de medidas las cuales sirven para el mejoramiento total en la producción de vapor en las calderas (Industrial Tijuana, 2012; Spirax Sarco, 2012) las cuales se resumen en:

- Recuperación de condensado y aislamiento térmico de la línea de retorno.
- Precalentamiento del agua fresca de alimentación con calor residual.
- Tratamiento químico del agua de alimentación de la caldera
- Regulación y control de flujos de purga de agua de la caldera.
- Reducción de aire en exceso.
- Precalentamiento del aire de combustión con calor residual.
- Aislamiento térmico del cuerpo de la caldera.
- Ajuste de los controles automáticos de la caldera.
- Regulación de carga de operación de la caldera.
- Regulación adecuada de las velocidades del tiro forzado e inducido.
- Reducción de la humedad del bagazo de alimentación.
- Regulación de la temperatura de los gases de salida.

3.4.2. Parámetros de las etapas de la producción de vapor sobrecalentado

La generación de vapor sobrecalentado se lleva a cabo en la caldera durante un proceso isobárico ($P=\text{cte}$) como se muestra en la fig. 3.1. Previo al proceso en la caldera, el agua de alimentación, que proviene de un deareador como líquido subenfriado, es transportada por una bomba multietapa para romper la presión interna del domo, al cual ingresa como líquido comprimido. A continuación, el agua comprimida es distribuida a la tubería interna de la caldera, recorrido en el cual su temperatura se incrementa debido al calor absorbido desde el hogar de la caldera (calor sensible en fase líquida) hasta alcanzar la temperatura de saturación correspondiente a una presión de vapor igual a la alta presión suministrada por la bomba. Una vez alcanzada la saturación (calidad: $x=0$), el calor absorbido (calor latente) provoca el cambio de fase, es decir el agua saturada experimenta una transición (vapor húmedo) hasta convertirse en vapor saturado y seco (calidad: $x=1$). El vapor saturado llega hasta el domo de vapor y a partir de ahí ingresa a la sección de sobrecalentamiento, donde se convierte en vapor sobrecalentado, es decir que el vapor continúa absorbiendo calor (calor sensible en fase vapor) hasta alcanzar una temperatura mucho mayor que la temperatura de saturación correspondiente a la presión de vapor que continúa siendo constante. El vapor sobrecalentado es el producto final, el cual se transporta a través de la línea de vapor hasta las turbinas.

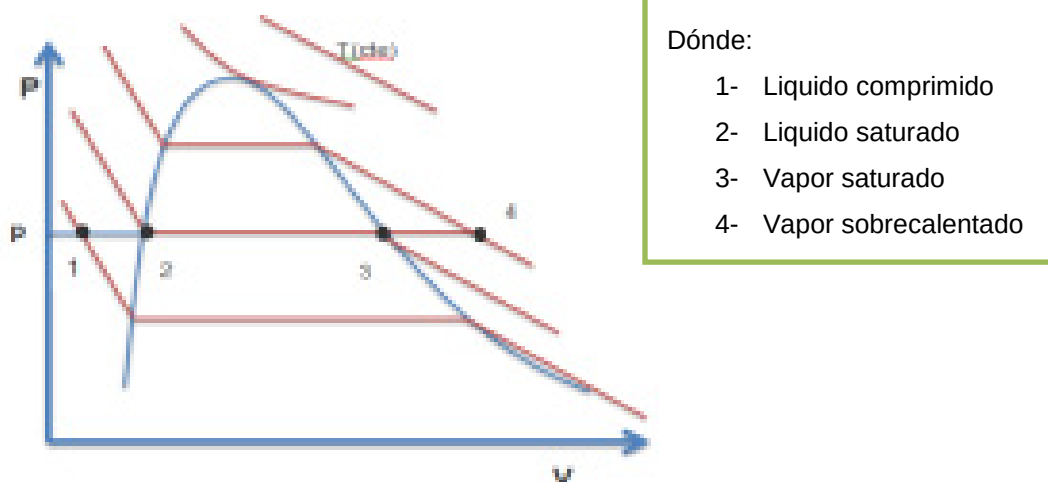


Fig. 3.5. Diagrama PV de la generación de vapor en un proceso isobárico

Calor suministrado en las combinaciones de las etapas:

1,2- Calor sensible

2,3- Calor latente

3,4- Calor sensible

donde p es la presión del flujo desde líquido comprimido hasta vapor sobrecalentado.

3.4.3. Cálculo del calor suministrado

Los efectos energéticos descritos en la sección 3.4.2 corresponden a las ecuaciones presentes a continuación.

El calor (Q) comúnmente se define como la parte del flujo total de energía a través de la frontera de un sistema que se debe a una diferencia de temperatura entre el sistema y su entorno.

Calor sensible

$$Q_s = mcp\Delta t \quad (3.20)$$

donde:

Q_s : calor sensible (Btu/h).

C_p : es la capacidad calorífica evaluada a temperatura media y expresada en Btu/lb^{°F}, J/kg, KJ/Kg^{°C}.

ΔT : es el cambio de temperatura experimentado, expresado en grados ^{°F} o ^{°C}.

m : es el flujo másico del fluido expresado en (lb/h).

Calor latente

$$Q_l = m\Delta h \quad (3.21)$$

Q_l : calor latente (Btu/h).

Δh : es el cambio de entalpia evaluada a presión y temperatura de operación constante y expresada en (Btu/lb).

Flujo de calor

$$Q = \frac{Q_t}{t} \quad (3.22)$$

Q : es el flujo de calor total expresado en (Btu/h)

t : tiempo (s)

Entalpía

$$H = U + p * V \quad (3.23)$$

U : es la energía interna.(J)

p : es la presión del sistema.(psi)

V : es el volumen del sistema. (M³,Lts)

Calor de combustión

$$Q_c = M_B * Cp_B \quad (3.24)$$

3.5 Equipos que comprenden la caldera como un solo equipo

3.5.1. Tipos de Hornos

Existen 4 tipos de hornos de bagazo: (Hugot 1986).

El horno de Gradilla

El horno de Cook, u horno de herradura

El horno Ward

El horno distribuidor

3.5.2 Horno de gradilla

Este tipo de horno clásico y es el que se emplea más frecuentemente.

La parrilla está formada de pequeñas placas de fundición, dispuestas en escalones su inclinación con la horizontal debe ser de 52° , valor que se recomienda la estación experimental de java, y la mayor parte de los fabricantes de calderas.

La parrilla consta de tres partes:

- I. La parte superior, o placa anterior, sin gradas ni aberturas para el paso del aire y en la que el bagazo se seca antes de pasar a la parrilla.
- II. La parrilla, corresponde a los escalones. Algunos fabricantes aumentan progresivamente el espacio entre los escalones, para relacionar la cantidad de aire que pasa a través del bagazo con el grado de combustión necesario. Generalmente el bagazo se enciende en los primeros escalones de la parrilla.
- III. La parte poco inclinada o cenicero, en la parte inferior de la parrilla, sobre la que se completa la combustión del bagazo y cuyas cenizas caen entre las barras al de positivo de estas.

3.5.3 Hogar o Cámara de Combustión.

Espacio donde se produce la combustión.

El hogar es la parte más importante y a la vez la más delicada de la caldera, pues de su diseño depende que pueda realizarse una formación de la llama y por tanto, se complete perfectamente en el mismo la combustión de la totalidad del combustible aportado, también debe estar sometido a la acción de la llama que posee alta temperaturas, es necesario dotar el horno lo más resistente posible y dilatibilidad necesaria para que cumpla con las normas de seguridad correspondientes (Hugot, 1986).

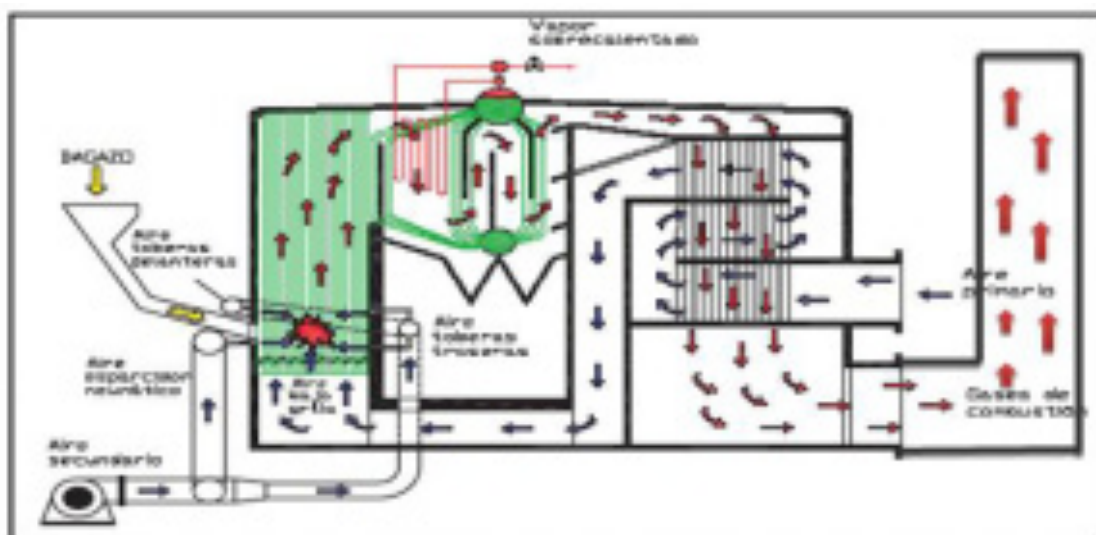


Fig. 3.6 Ilustración de una caldera acuotubular.

Tabla 3.7 Niveles aceptables de CO_2 en los combustibles (Hugot, 1986).

Combustibles	% CO_2
Líquidos	12 – 14
Gaseosos	8 – 10
Carbón	13 – 17
Bagazo	12 – 14
Maderas	11 -16

Los productos del proceso de combustión son gases calientes que sirven de medio para transferir la energía contenida en los combustibles al medio que queremos calentar.

Una vez que los gases de la combustión conducen el calor tienen que ser evacuados para permitir que el proceso continúe.

Los gases se mueven por efecto de diferencias de presiones y siempre el flujo será de las zonas de mayor presión a las de menos presión.

Es necesario mantener un flujo estable entre la entrada de aire y la evacuación de los gases de combustión de la chimenea para el logro de una combustión eficiente.

A la mayor o menor facilidad con que se produce la entrada de aire al hogar y las salida de los gases a la chimenea tras su recorrido a través de las superficies de calefacción de la caldera se denomina tiro y las pérdidas de energía por fricción, turbulencia, variaciones de velocidad de los gases se les llama perdidas de presión de tiro.

3.5.4 Chimeneas

Los productos de la combustión se expulsan de la caldera a través de las cajas de humo para descargarlos en la chimenea.

Las chimeneas pueden constituirse metálicas o de mampostería y sus alturas varían de acuerdo con las características de la caldera y tratando de evitar la contaminación ambiental, pueden tener alturas apreciables y las regulaciones del MINSAP (ministerio de salud pública) exigen que tengan colectores de hollín. Además deben poseer una cubierta o gorro para evitar la entrada de agua de lluvia. Un mal diseño del diámetro, altura y gorro de la chimenea producen deficiencias en el tiro y por ende perdidas de eficiencias de la combustión (CDEM, 2005).

3.5.5 Sistema de evacuación de gases de chimeneas

Los gases de combustión, una vez que han entregado su contenido energético para la producción de vapor, son evacuados del interior de la caldera mediante tres tipos de sistemas: Tiro natural, tiro forzado y tiro inducido (Rubio, 2002).

Estos mecanismos de evacuación de los gases también contribuyen a la calidad de transferencia de calor entre los gases y el agua que se evapora, ya que un régimen turbulento con alto número de Reynolds genera altos coeficientes de transferencia de calor. El número de Reynolds se define como:

$$Re = \frac{Dv_s\rho}{\mu} \quad (3.25)$$

Donde:

v_s = velocidad característica del fluido (m/s)

D = diámetro de la tubería a través de la cual circula el fluido (m)

μ = viscosidad dinámica del fluido (N.s/m²)

ρ = densidad del fluido (kg/m³)

Tiro natural

El tiro natural es aquel que crea una chimenea sin que intervenga algún equipo mecánico. El tiro natural es el que se establece única y exclusivamente por el efecto de la diferencia de densidades entre los gases en el interior de la chimenea y el aire de la atmósfera y en el cual no toma parte ningún equipo mecánico.

El tiro teórico o también el tiro estático, que no es más que la diferencia de presión entre 2 puntos uno dentro de la chimenea y otro en la atmosfera y para uniformizar los valores se utilizan como punto de referencia la base de la chimenea.

Se expresa matemáticamente así:

$$\Delta p = p_e - p_i \quad (3.26)$$

Donde:

Pe: presión atmosférica en el exterior a la altura de la basa de la chimenea.

Pi: presión en el interior a la altura de la basa de la chimenea.

$$p_e = p_a + Z \rho_a g \quad (3.27)$$

$$p_i = p_a + Z \rho_g g \quad (3.28)$$

Donde:

Pa: presión atmosférica a la altura de la chimenea (Pa).

Z: altura de la chimenea (m).

ρ_a : Densidad del aire frío (kg/m^3).

ρ_g : Densidad de los gases calientes (kg/m^3).

g: aceleración de la gravedad (m/s^2).

Sustituyendo 2 y 3 en 1 se obtiene:

$$\Delta p = z g (\rho_a - \rho_g) \quad (3.29)$$

Teniendo en cuenta que los valores del tiro son muy pequeños, lo más adecuado es pasarlo a mm de H₂O a 15.5 °C para lo de la expresión anterior se aplican unas transformaciones. Considerando el aire y los gases calientes como ideales.

$$\Delta p = Z g \left(\frac{p_a}{R_a T_a} - \frac{p_g}{R_g T_g} \right) \quad (3.30)$$

Consideremos: $R_a = R_g = 0.2869 \text{ (J/kg.k)}$

$P_a = P_g =$ presión atmosférica

Se obtiene:

$$\Delta p = CZp_a \left(\frac{1}{T_a} - \frac{1}{T_g} \right) \quad (3.31)$$

Donde:

C: constante de conversión (C= 3.486)

Z: altura de la chimenea (m).

Ta: temperatura absoluta del aire del ambiente (°K).

Tg: temperatura absoluta de los gases (°K).

Tiro disponible = tiro teórico – pérdida por fricción.

Tiro forzado

El tiro forzado tiene que tomar el aire de la atmosfera y pasarlo a través del calentador de aire, descargándolo al horno, por lo tanto se puede decir que tiene 2 funciones principales:

- ✓ Suministrar al horno el aire necesario para la combustión.
- ✓ Vencer todas las resistencias que se opongan al aire hasta que sea descargado al horno.

Ventiladores usados en el tiro forzado.

Ventiladores axiales:

- La descarga del gas es paralela al eje de rotación.
- Poseen alta eficiencia 85 – 90%.
- Dan presión a la descarga baja.

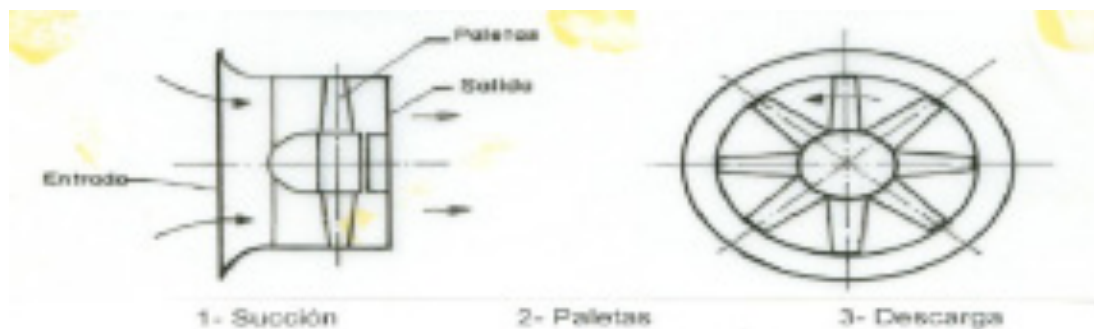


Fig 3.7 Esquema de un ventilador axial

Para el cálculo y operación de los ventiladores se utilizan las leyes de los ventiladores:

$$\frac{G_2}{G_1} = \left(\frac{N_{v2}}{N_{v1}} \right) \quad (3.32)$$

$$\frac{P_{r2}}{P_{r1}} = \left(\frac{N_{v2}}{N_{v1}} \right)^2 \quad (3.33)$$

$$\frac{W_{t2}}{W_{t1}} = \left(\frac{N_{v2}}{N_{v1}} \right)^3 \quad (3.34)$$

Donde:

G: caudal (m³/h).

Pr: presión (mm de la columna de agua).

Wt: potencia requerida (Watt).

Nv: número de revoluciones por minuto.

Los ventiladores axiales pueden mover mayor volumen de gases.

Tiro inducido

Es el equivalente mecánico del tiro natural y consiste en situar un ventilador en el camino de la salida de los gases, que los extraiga de la caldera y los impulse hacia la chimenea.

El ventilador de tiro inducido se usa cuando las pérdidas de presión en los conductos de gases son de gran magnitud que para lograrlo con una chimenea se hace incosteable o cae en los rangos de presión que los ventiladores de tiro forzado no pueden alcanzar.

Normalmente se utilizan ventiladores de tiro inducido en:

- Calderas de 4 pases de humo.
- Calderas con conductos de humo muy largos.

3.5.6 Intercambiadores de calor o calentadores

Pre-Calienta el agua de alimentación de la caldera es un intercambiador de tubos y coraza.

Dos corrientes en contracorriente:

Los fluidos se desplazan en condiciones paralelas pero en sentidos opuestos (A.F.Mills, 1999).

3.5.7 Sobrecalentadores

Son intercambiadores de calor, dispuestos en el paso de los gases calientes.

Los sobrecalentadores reciben el vapor saturado o ligeramente húmedo que viene del domo de la caldera y lo pasan sobrecalentando al colector general de vapor de la fábrica (Rubio, 2002).

3.5.8 Domo de Vapor y de Agua

Es un recipiente herméticamente para cerrado para calentar agua y producir vapor saturado y sobrecalentado.

3.5.9 Haz Tubular

Es una tubería que conecta el domo inferior al domo superior.

3.5.10 Economizador

Es un intercambiador de calor que se coloca en la chimenea de la caldera para transferir el calor contenido en los gases de combustión al de agua de alimentación a la caldera.

3.5.11 Ventajas del economizador

- ✓ Se incrementa la eficiencia térmica de la caldera lo cual proporciona un ahorro de combustible por kg de vapor generado.
- ✓ Se reduce la emisión de gases calientes a la atmosfera.
- ✓ Se alimenta agua caliente a la caldera reduciendo el shock térmico.

3.5.12 Sopladores de Hollín

El sistema de soplado es constituido por los siguientes sopladores:(INE, 1993).

- ✓ Dos sopladores de hollín de tipo rotativo retráctil, instalados en el sobrecalentador.
- ✓ Cuatro sopladores de hollín de tipo rotativo fijo, instalados en el haz tubular.

El sistema es completo, con las válvulas necesarias, según lo exigido.

El material de las lanzas de los sopladores es adecuado para la faja de temperatura de trabajo en la región de soplaje y las boquillas de pulverización están diseñadas de forma de proporcionar chorros de soplo, con elevada energía de movimiento y grande penetración.

El soplador de hollín tipo retráctil, está instalado en la región de temperaturas elevadas, sujetas a incrustaciones moderadas. El elemento de soplo permanece fuera de la caldera, siendo que a través de su mecanismo, éste es inserido y retirado de la caldera durante el proceso de limpieza.

3.5.13 Purga de fondo

Evacuación de lodos y concentrado del fondo de la caldera.

3.5.14 Desaireador

Es el sistema que expulsa los gases insolubles contenidos en el vapor de agua.

3.5.15 Ventiladores primarios y secundarios

Producen turbulencia en el hogar para que el bagazo se queme antes de caer a la parrilla.

3.5.16 Calentadores de agua

Estos calentadores precalientan el agua que entra al domo con el vapor agotado que sale de los turbos generadores el cual le transfiere calor en el intercambiador de tubo y coraza. Estos calentadores solo se usan en cogeneración.

3.6 El calentamiento es esencial

Cuando una caldera se pone en marcha que haga de una manera lenta segura y controlada, para evitar: (Caldema, 2000).

3.6.1 Golpes de ariete

Grandes cantidades de condensado que están dentro de la tubería y se empujan a lo largo de la tubería a velocidades de vapor y producen daños cuando el agua choca con una obstrucción en la tubería, como una válvula de control.

3.6.2 Choque (Shock) térmico

Las tuberías se calientan tan rápidamente que la expansión no se puede controlar, causando tensiones en las tuberías y provocando grandes movimientos en los apoyos de las tuberías.

3.6.3 Arrastres

Una reducción repentina de presión en la caldera puede producir arrastres de agua de la caldera a las tuberías. Esto no sólo es perjudicial para el funcionamiento de la planta, la caldera puede bloquearse y tardará algún tiempo en poner la caldera en estado operativo.

3.7 Balance de Materia y Energía

3.7.1. Balance de materia

Para efectuar un balance de materia de un proceso, primero hay que especificar en qué consiste el sistema para el cual se hará el balance y establecer sus fronteras.

Un proceso es una serie de acciones, operaciones y tratamientos que producen resultados (Himmelblau, 1997). Un sistema se refiere a cualquier porción arbitraria o la totalidad de un proceso establecida específicamente para su análisis.

Los sistemas se clasifican en sistemas abiertos y cerrados:

Sistema abierto (o continuo)

Es aquel en que se transfiere material por la frontera del sistema; esto es, entra en el sistema, sale del sistema o ambas cosas.

Sistema cerrado (o por lotes)

Es aquel en el que no tiene lugar una transferencia semejante durante el intervalo de tiempo de interés. Obviamente, si cargamos un reactor con los reactivos y sacamos los productos, y se designa al reactor como el sistema, se transferirá material a través de la frontera del sistema, pero podemos ignorar la transferencia y concentrar nuestra atención exclusivamente en el proceso de reacción que ocurre sólo después de que se ha terminado de cargar los reactivos y antes de retirar los productos.

Un balance de materia no es más que una contabilización de material. Es común comparar los balances de materia con los balances de cuentas de cheques. Se deposita y se retira dinero, y la diferencia entre los saldos inicial y final representa la acumulación (o el agotamiento) de la cuenta.

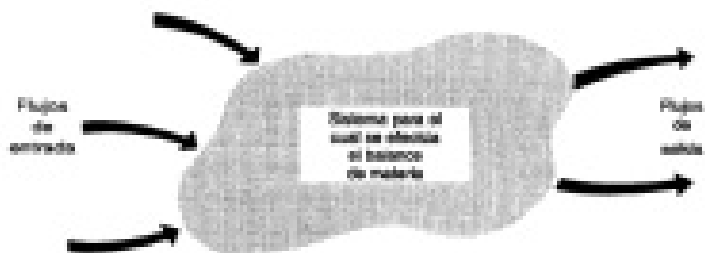


Fig 3.8. Sistema de volumen especificado en el cual se efectuaran balances de materia.

El balance de una cantidad que se conserva (masa total, masa de una especie determinada, energía, momentum) en un sistema (una sola unidad de proceso, conjunto de unidades o un proceso completo) se puede escribir de manera general como: (Felder, 2004)

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{acumulacion} \\ \text{dentro del} \\ \text{sistema} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \text{entrada por} \\ \text{las fronteras} \\ \text{del sistema} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{l} \text{salida por} \\ \text{las fronteras} \\ \text{del sistema} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} \text{generación} \\ \text{dentro del} \\ \text{sistema} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{l} \text{consumo} \\ \text{dentro del} \\ \text{sistema} \end{array} \right\}$$

3.7.2. Balance de energía

Es un principio físico tan fundamental que inventamos nuevas clases de energía para asegurar que la ecuación quede realmente balanceada; esto es la reducción en el desperdicio de energía o el aumento en la eficiencia de utilización de la energía (Himmelblau, 1997).

La siguiente ecuación expresa con palabras el concepto del balance de energía:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{acumulación} \\ \text{de energía} \\ \text{dentro del} \\ \text{sistema} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \text{transferencia} \\ \text{de energía} \\ \text{al sistema} \\ \text{a través de} \\ \text{su frontera} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{l} \text{transferencia} \\ \text{de energía} \\ \text{hacia fuera} \\ \text{del sistema} \\ \text{a través de} \\ \text{su frontera} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} \text{generación} \\ \text{de energía} \\ \text{dentro del} \\ \text{sistema} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{l} \text{consumo} \\ \text{de energía} \\ \text{dentro} \\ \text{del sistema} \end{array} \right\}$$

Para los calentadores No. 2 y No. 3 se calcularon balances de materia y energía.

En los calentadores la masa acumulada y la energía acumulada se eliminan porque lo que entra es igual a lo que sale, este punto dentro del calentador solo hay contacto de transferencia para calentar el agua que se le introduce a la caldera con el vapor agotado, esto se da en estado estacionario ya que las temperaturas de entradas y salidas no varían con el tiempo ya están establecidas, este caso es válido para el balance de energía porque no hay acumulación dentro de ellos.

En procesos continuos estacionarios, el término de acumulación de la ecuación general balanceada, es igual a cero por lo que la ecuación se simplifica como:

$$\text{masa entra} + \text{generacion} = \text{salidas} + \text{consumo} \quad (3.35)$$

Si se realiza el balance de una especie no reactiva o de masa total, los términos de generación y consumo son iguales a cero y la ecuación se reduce a: (Felder, 2004)

$$\text{masa entra} = \text{masa salida} \quad (3.36)$$

$$w_1 + w_2 = w_3 \quad (3.37)$$

$$w_3 = w_4 \quad (3.38)$$

$$\text{energía entra} - \text{energía salida} = \text{energía acumulada} \quad (3.39)$$

$$\text{energía entra} = \text{energía salida} \quad (3.40)$$

$$w_1 h_1 + w_2 h_2 = w_3 h_3 \quad (3.41)$$

Donde:

$w_1, w_2, w_3, w_4, w_5, w_6, w_7$ y w_8 son flujos másicos (lbs/h).

$h_1, h_2, h_3, h_4, h_5, h_6, h_7$ y h_8 son las entalpías (btu/lbm).

$p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, p_6, p_7$, y p_8 son las presiones (Psi).

$t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6, t_7$ y t_8 son las temperaturas ($^{\circ}\text{F}$).

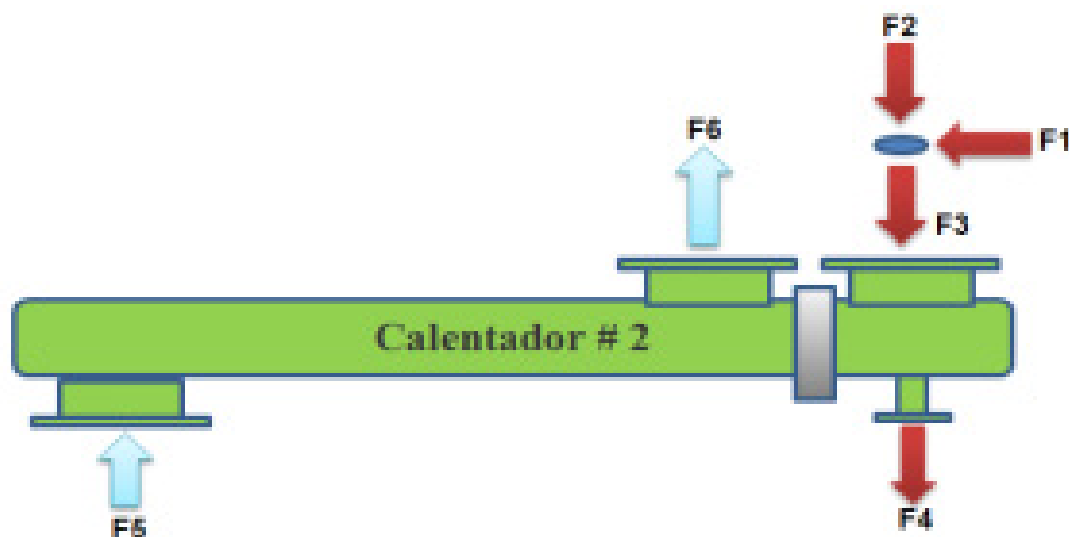


Fig. 3.9 Calentador No. 2

El balance de materia no se pudo hacer independiente ya que se necesitaba las entalpías para poder calcular masa y temperatura en las diferentes entradas y salidas.

En este caso estos calentadores trabajan en sistemas abiertos ya que son continuos.



Fig. 3.10 Calentador No. 3

Para el calentador No. 3 se calcularon igual flujos másico y temperaturas pero además se debía calcular calor cedido para poder obtener la temperatura de salida del mismo, las ecuaciones para este efecto energético son aquellas dadas por las ecuaciones (3.20) y (3.21).

IV. Metodología

4.1. Determinar la eficiencia del sistema de generación de vapor

La Evaluación Tecnológica de la Eficiencia Térmica de las Calderas No. 6 y No. 7 del Ingenio Monte Rosa en el periodo de Zafra 2011-2012, se llevó a cabo con los datos reales obtenidos directamente de la planta, se calcularon eficiencia térmica (3.1) con valores promedios por día de zafra, la síntesis de este cálculo se esquematiza en la figura 4.1, la desviación estándar calculada de los datos y promedios por día da una idea de la dispersión de los valores entorno a cada parámetro.

Se calculó cantidad de gases de la combustión, temperatura de salida y balance de materia y energía en los calentadores instalado en la misma zafra con el propósito de funcionar en la cogeneración.

En la evaluación realizada se emplearon las siguientes herramientas fundamentales.

4.2. Diagnostico técnico preliminar

Se evaluó el funcionamiento actual de las calderas y las condiciones de los instrumentos de medición necesarios para la realización de los estudios de las mismas, esto con ayuda de la información existentes operacionales, para verificar que se encontraban dentro del rango de operación.

Se hizo diariamente durante un periodo del 27 de febrero al 13 de julio del 2012. En este tiempo se identificaron los principales parámetros que influyen en la combustión en el hogar los que se enumeran en el párrafo 4.3, también se observaron problemas continuos con la humedad del bagazo que entra al hogar a combustionar.

4.3. Identificación parámetros involucrados en el proceso de combustión y generación de vapor

Dichos parámetros fueron tomados diariamente por hora durante todo el período de zafra 2011-2012.

Los principales parámetros involucrados para el proceso de combustión:

1. Cantidad del combustible (kg)
2. Humedad del combustible (%)
3. Cantidad de oxígeno requerido para la combustión (kg)
4. Cantidad de aire (kg)
5. Cantidad de gases de salida (kg)
6. Eficiencia de la combustión (%)
7. Temperatura ambiente (°F)
8. Temperatura del hogar (°F)
9. Temperatura de gases de salida (°F)
10. Velocidad del tiro forzado (Hz)
11. Velocidad del tiro inducido (Hz)

Los principales parámetros involucrados para el proceso de generación de vapor:

1. Presión de la bomba (psi)
2. Alimentación de agua al domo (gpm)
3. Temperatura de vapor (°F)
4. Presión del domo (psi)
5. Temperatura de los gases de salida de la combustión (°F)
6. Temperatura del agua de alimentación (°F)

Los datos fueron medidos por sensores automáticos instalados en los equipos que comprenden la caldera, los cuales son recolectados por el departamento de automatización y otros por cuenta propia con ayuda del analizador de gases, se obtuvieron porcentaje exceso de aire, O₂, CO₂, eficiencia de combustión y

temperaturas de gases de salida. Estos datos fueron de apoyo para realizar la evaluación de la eficiencia térmica.

4.4. Análisis del proceso de combustión

Para realizar el análisis de la combustión se llevaron una serie de cálculos según el siguiente orden y se esquematizan en la figura 4.2.

4.5. Determinación de cantidad teórica del aire para la combustión

El aire teórico se obtuvo a partir de la composición del combustible con la ecuación (3.12), con la cual se obtuvo el aire necesario en m^3 por kg de bagazo.

4.6. Cantidad y contenido de los productos de la combustión

Se obtuvieron a partir de la composición del combustible los cuales son oxígeno (3.16), nitrógeno (3.17), agua (3.18) y dióxido de carbono (3.19) las cuales se calcularon individualmente y luego se sumaron para encontrar el volumen total de los gases de combustión que salen por la chimenea.

4.7. Balance de materia

Permite encontrar flujo de entrada y salida de los calentadores la cual en uno de ellos no se presentaba en el diagrama y se procedió a calcular esquematizado en la figura 4.3.

En este caso en el balance de materia no hay acumulación, lo que entra es igual a lo que sale, la acululacion es igual a 0 por tanto la ecuacion queda como (3.36).

Se calculó con las ecuaciones (3.37), (3.38) y (3.41) para poder obtener el balance de materia.

4.8. Balance de energía

Con la ayuda del balance de materia y energía se pudo calcular las entalpías con las cuales se obtuvieron la temperatura del calentador No. 2 y con la ecuación (3.20), y se despejó la temperatura 1 del calentador No. 3 para poder calcular la temperatura de salida del mismo.

Este caso es semejante al de balance de materia no hay acumulacion por lo tanto lo que entra es igual a lo que sale, por lo tanto la ecuacion queda como (3.40).

Pero antes de todo para completar el cálculo se tuvieron que utilizar las ecuaciones (3.21) y (3.41), Para completar este balance.

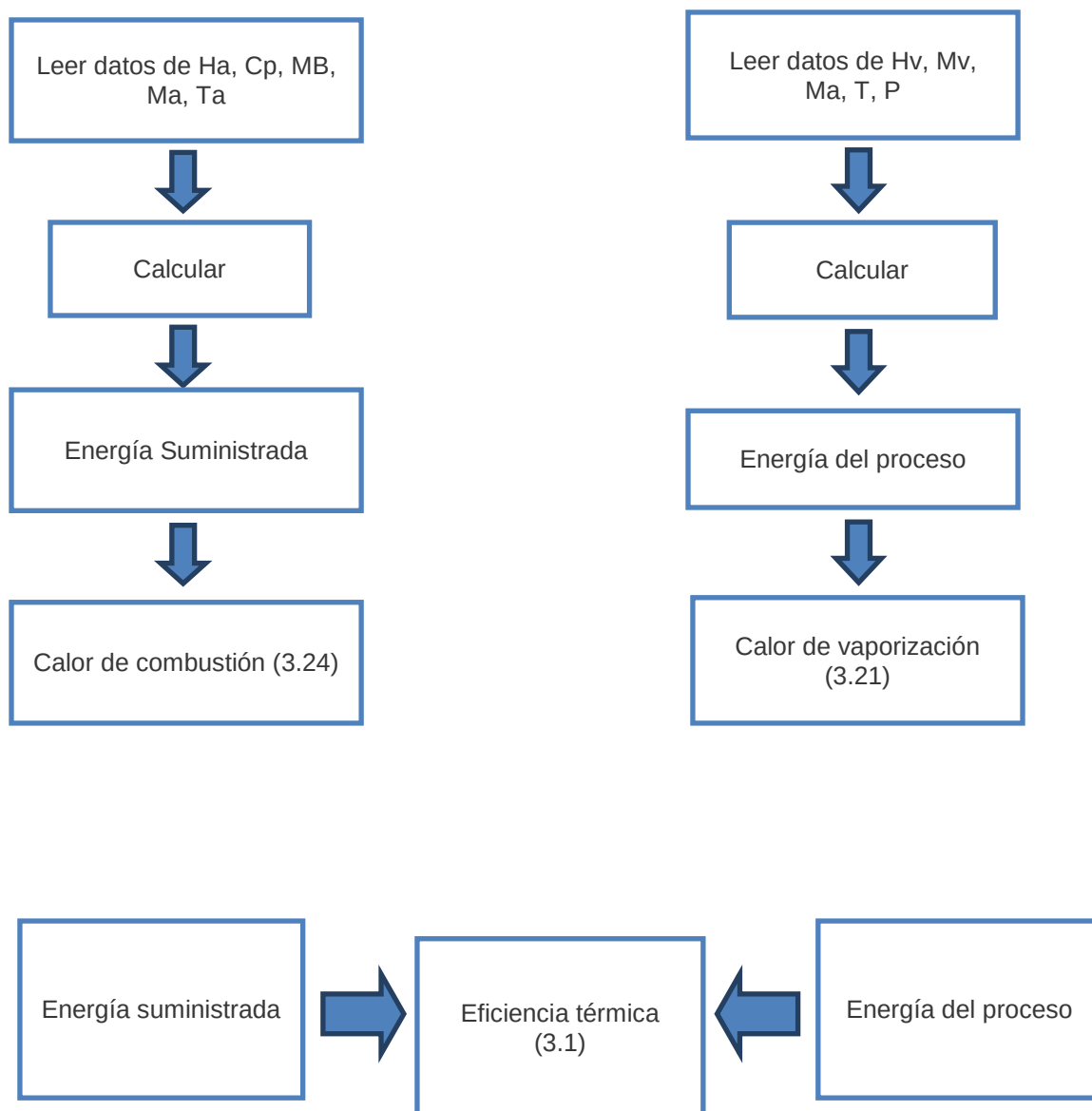


Fig.4.1 Metodología para calcular la eficiencia térmica de las calderas No. 6 y 7 del Ingenio Monte Rosa.

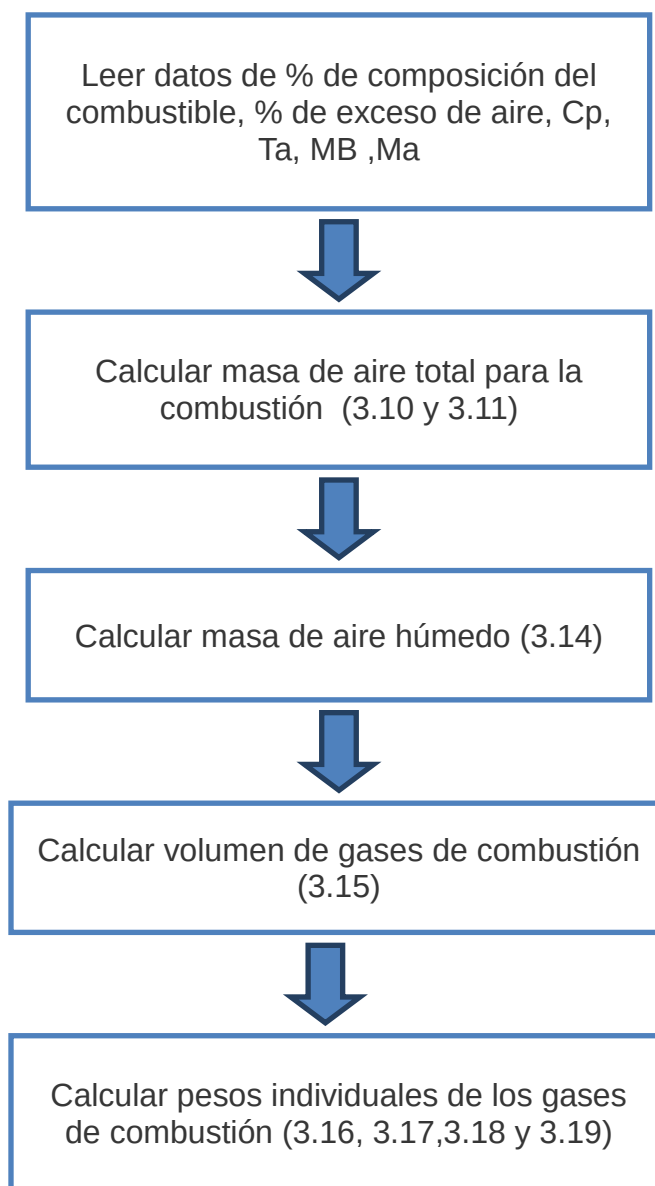


Fig. 4.2 Diagrama de bloque para el proceso de combustión.

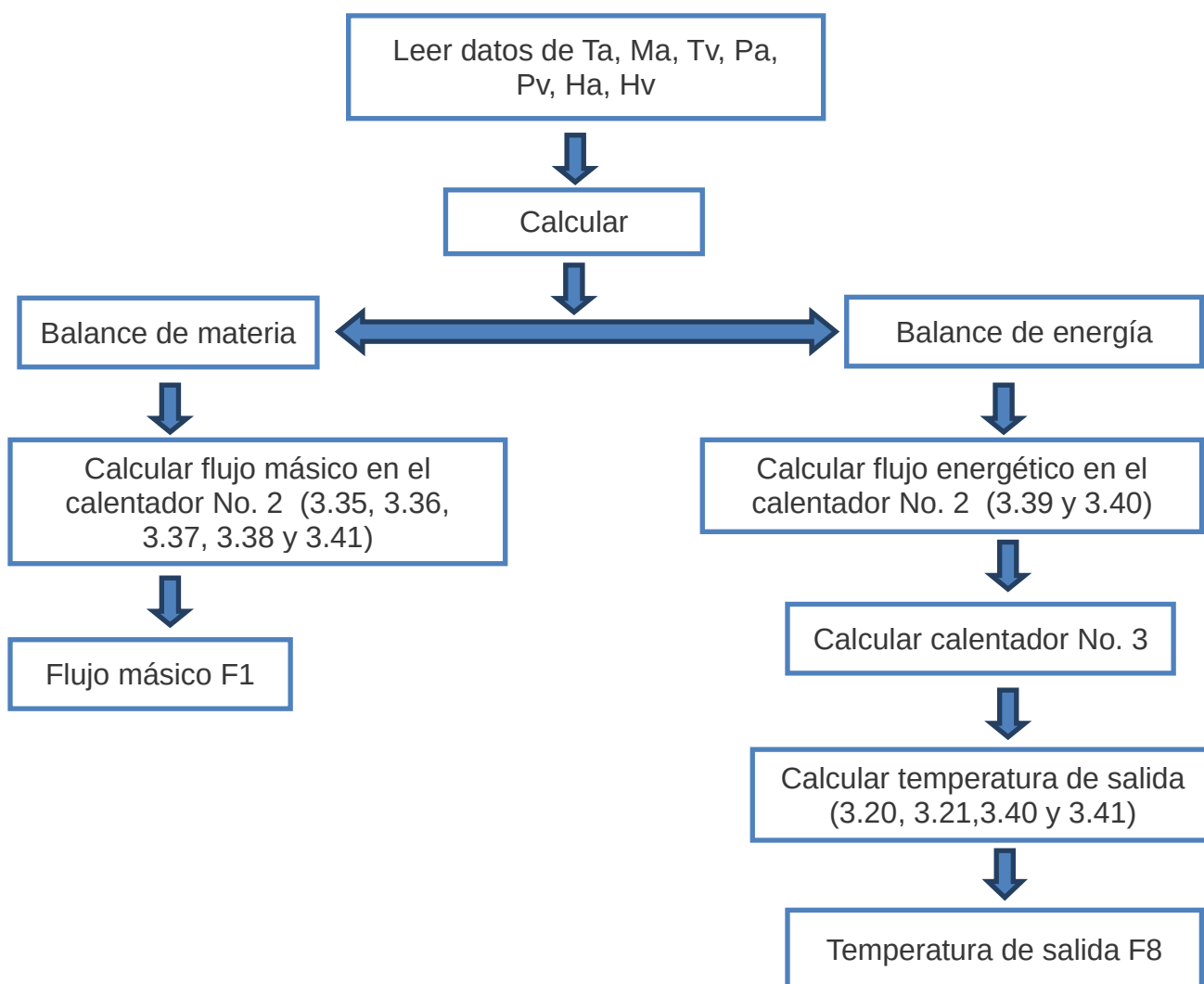


Fig. 4.3 Diagrama de bloque para el cálculo de balance de materia y energía para los calentadores No. 2 y No 3.

V. Presentación y discusión de resultados

Los resultados que a continuación se presentan corresponden a los parámetros en el proceso de generación de vapor, los cuales fueron obtenidos en el análisis basado en los datos tomados y cálculos realizados del proceso de combustión que ocurre en la caldera.

En el periodo de zafra 2011-2012 las calderas No. 6 y No. 7 trabajaron sin problemas de operación y se recopiló la información necesaria de los parámetros de operación de las calderas y sus equipos periféricos del Ingenio Monte Rosa.

5.1 Influencia de los parámetros de operación en el funcionamiento de las calderas

Los parámetros que influyen en el funcionamiento de las calderas y sus equipos periféricos fueron medidos por sensores de nivel, termómetros, flujómetros y manómetros instalados en dichos equipos.

5.1.1 Parámetros principales que influyen en la combustión

Los principales parámetros medidos tienen influencia directa en el proceso de combustión siendo estos: humedad y cantidad del bagazo quemado, temperatura del hogar y de gases de salida, exceso de aire, eficiencia de combustión y velocidades del tiro forzado e inducido. (Industrial Tijuana, 2012; Spirax Sarco, 2012).

También se incluyen parámetros calculados, los cuales no fueron medidos en el ingenio por falta de equipos de medición instalados para su monitoreo como: la cantidad de aire introducido al hogar y la cantidad de gases de salida.

El comportamiento del historial de las figs. 5.1 y 5.2 muestran la relación en el tiempo entre el bagazo quemado y el exceso de aire introducido para completarse la reacción de combustión.

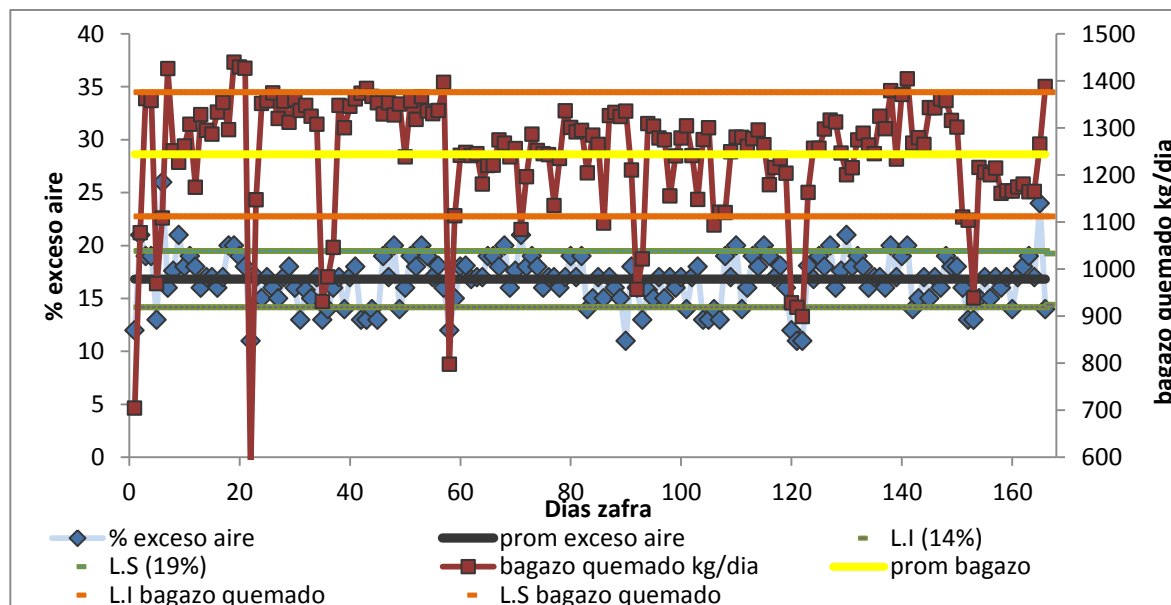


Fig. 5.1 Comportamiento del porcentaje de exceso de aire vs combustible (kg/día) en la caldera No. 6.

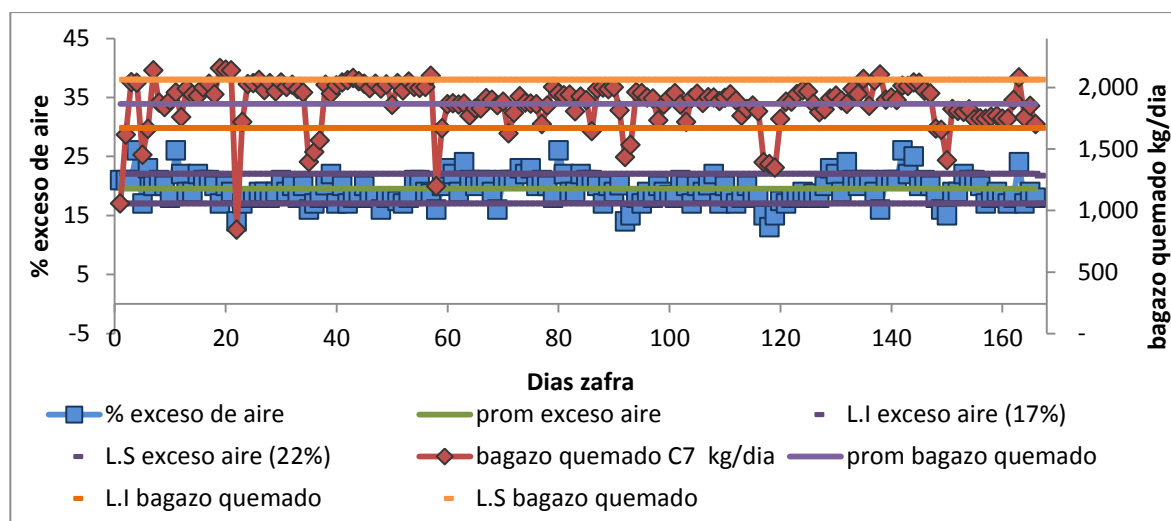


Fig. 5.2 Comportamiento del porcentaje de exceso de aire vs combustible (kg/día) en la caldera No. 7.

Tabla 5.1 Desviación estándar del exceso de aire y bagazo quemado de las figs. 5.1 y 5.2.

Figura	σ (exceso aire %)	σ (bagazo quemado kg/día)
5.1	2	132
5.2	2	197

En las figs. 5.1 y 5.2 se pueden observar que el exceso de aire no varía significativamente. La mayoría de las oscilaciones se encuentran dentro de los límites de control, al igual que la relación entre el bagazo quemado con respecto al exceso de aire. Se observa que en ciertos días de zafra se quemó el mínimo de bagazo en las calderas, y así fue su exceso de aire. Esta relación dependiente entre sí por los parámetros esta descrita en la sección 3.3.5 por (Danilin, 1999). La desviación estándar para el exceso de aire y bagazo quemado son mínimas respecto a su promedio total por lo que se proponen ser aceptables sus condiciones de trabajo, aunque no estén dentro de los rangos de exceso de aire apropiados para combustibles sólidos, los cuales son entre 40 y 60% para calderas acuotubulares según Hugot (1986). Es probable que la reacción de combustión se complete si cumplen con este requisito que por lo tanto ayudará al aumento del calor de combustión.

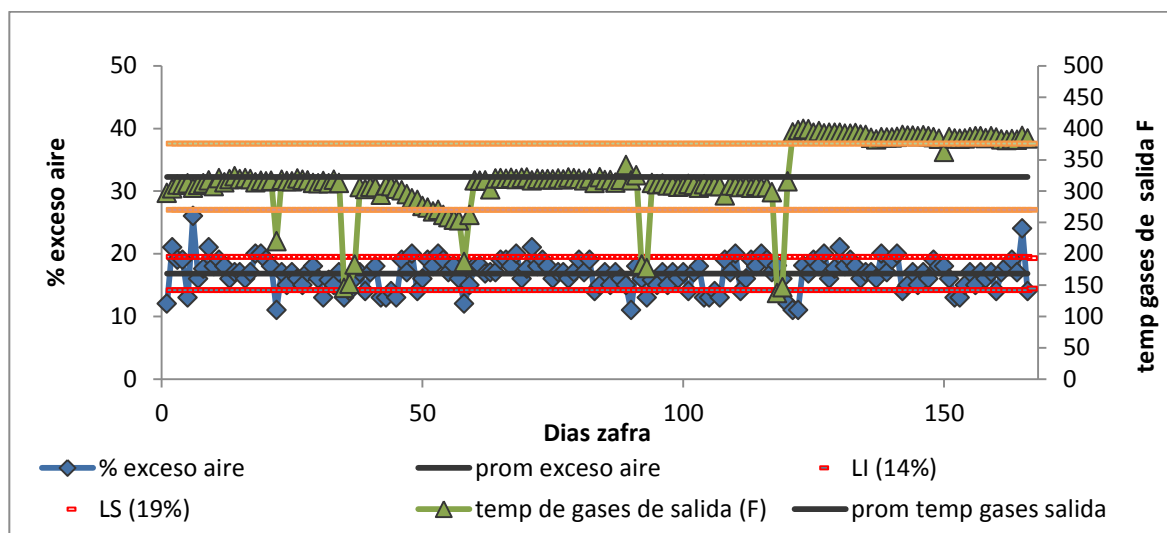


Fig. 5.3 Comportamiento del porcentaje de exceso de aire vs temperatura de salida de los gases de combustión ($^{\circ}$ F) en la caldera No 6.

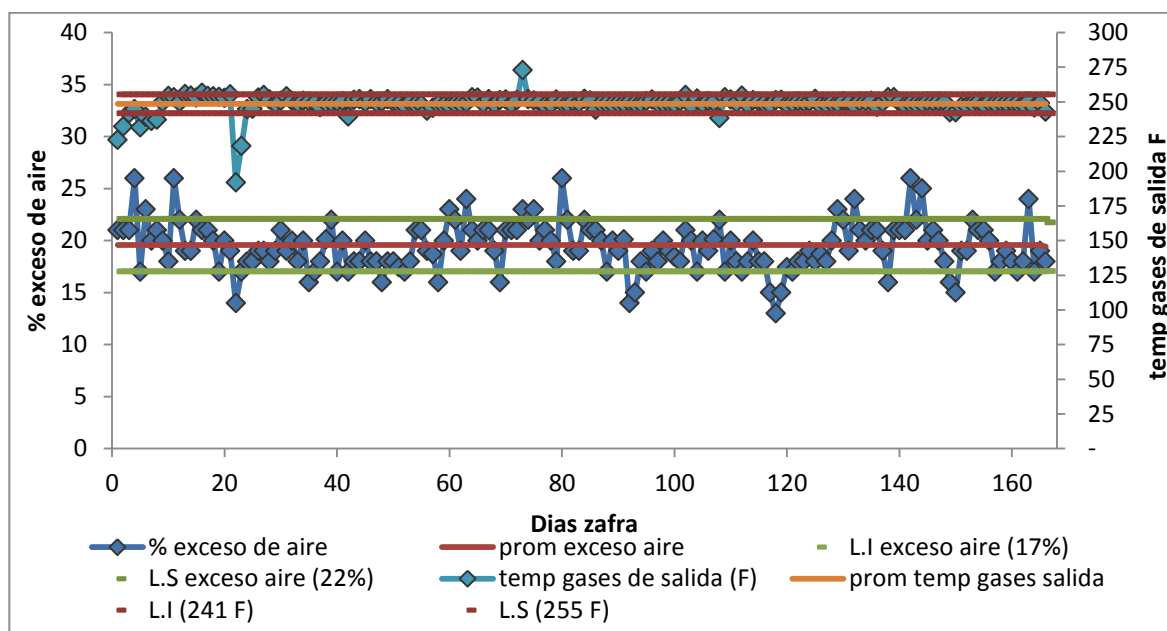


Fig. 5.4 Comportamiento del porcentaje de exceso de aire vs temperatura de salida de los gases de combustión ($^{\circ}$ F) en la caldera No. 7.

Tabla 5.2 Desviación estándar del exceso de aire y temperatura de salida de los gases de las figs. 5.3 y 5.4.

Figura	σ (exceso aire %)	σ (temp. gases °F)
5.3	2	17
5.4	2	6

En las figs. 5.3 y 5.4 los valores apropiados de temperatura de salida de los gases de combustión, es propicio para un buen funcionamiento del economizador. El exceso de aire incide en el incremento de temperatura, lo cual ocurre cuando se produce una combustión completa en la que el bagazo desprende el total de su energía. Pero si se introduce mayor cantidad de exceso de aire, éste arrastrará energía del hogar hacia la salida de los gases, lo cual significa pérdidas de energía para el proceso de evaporación del agua y en cambio; si el exceso de aire es muy bajo se produce una combustión incompleta. Este déficit de combustión produce mucho bagacillo parcialmente quemado y monóxido de carbono, el cual es arrojado por la chimenea, lo que implica perdidas de energía al proceso y contaminación ambiental. También se debe controlar las velocidades del tiro inducido que es el que incide sobre el tiempo de contacto en el economizador regulado con la velocidad de éste para mejorar el incremento de la transferencia de calor.

En la fig. 5.3 desde el día de zafra 130 a 166 hay un leve incremento de temperatura de gases de salida que sobrepasa el límite superior, lo que indica que posiblemente el tiro inducido aumentó su velocidad de descarga de gases hacia la chimenea, lo que implica una disminución en la transferencia de calor de los gases de salida hacia el agua de alimentación de la caldera en el economizador.

En la fig. 5.4 el día 73 de zafra se dispara la temperatura de gases de salida, pero esta fue corregida inmediatamente en sus días posteriores. Su oscilación se encuentra dentro de sus límites de control.

En la tabla 5.3 se puede observar que los valores promedios obtenidos de los principales parámetros influyen en la combustión que se produce en el hogar de las calderas No. 6 y 7. Estos intervienen de forma directa al mejoramiento de la combustión y si cualquier parámetro que oscile de forma excesiva por debajo o por arriba a este promedio, produce deficiencias en la operación de generación de vapor, excluyendo el exceso de aire ya que lo introducen como si se estuviese quemando combustibles líquidos y el exceso de aire para combustibles sólidos es de 40 a 60%, estos promedio son por los 166 días de zafra.

Tabla 5.3 Valores promedios de los parámetros principales que influyen en la combustión.

Caldera No.	Masa de aire promedio (ton/día)	% exceso de aire promedio	Humedad del bagazo %	Cantidad de bagazo promedio (ton/día)	Temperatura del hogar (°F) promedio	Temperatura los gases de salida (°F) Promedio
6	7104.098	16.83	51	1231.23	1124.17	427
7	10656.147	20.06	51	1847	1445.66	311

5.1.2 Parámetros principales para el balance térmico

El balance térmico se realizó partiendo de la energía que entra al sistema, la cual es producida por el combustible que se quema en el hogar de la caldera.

Los combustibles sólidos, líquidos y gaseosos poseen un poder calórico, el cual se desprende cuando se produce la reacción de combustión. En este caso, el bagazo que combustiona transfiere su contenido energético al agua que se

encuentra en el domo de la caldera, aumentando la temperatura hasta llevarla a su punto de ebullición, produciendo el vapor saturado y luego es sobrecalentado obteniendo el vapor deseado en el ingenio.

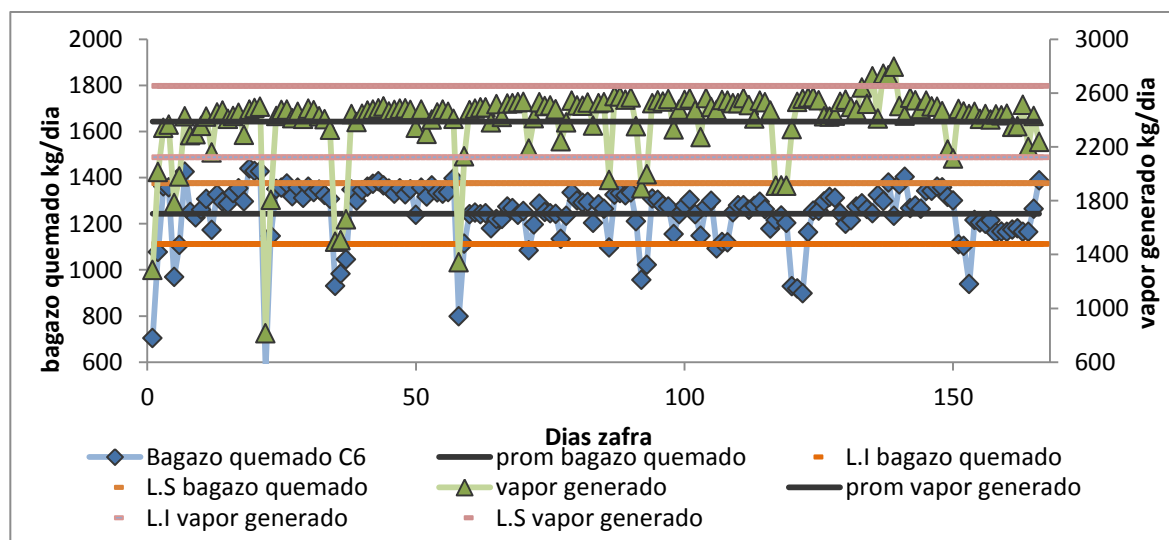


Fig. 5.5 Comportamiento del bagazo quemado (kg/día) vs vapor generado (kg/día) caldera No. 6.

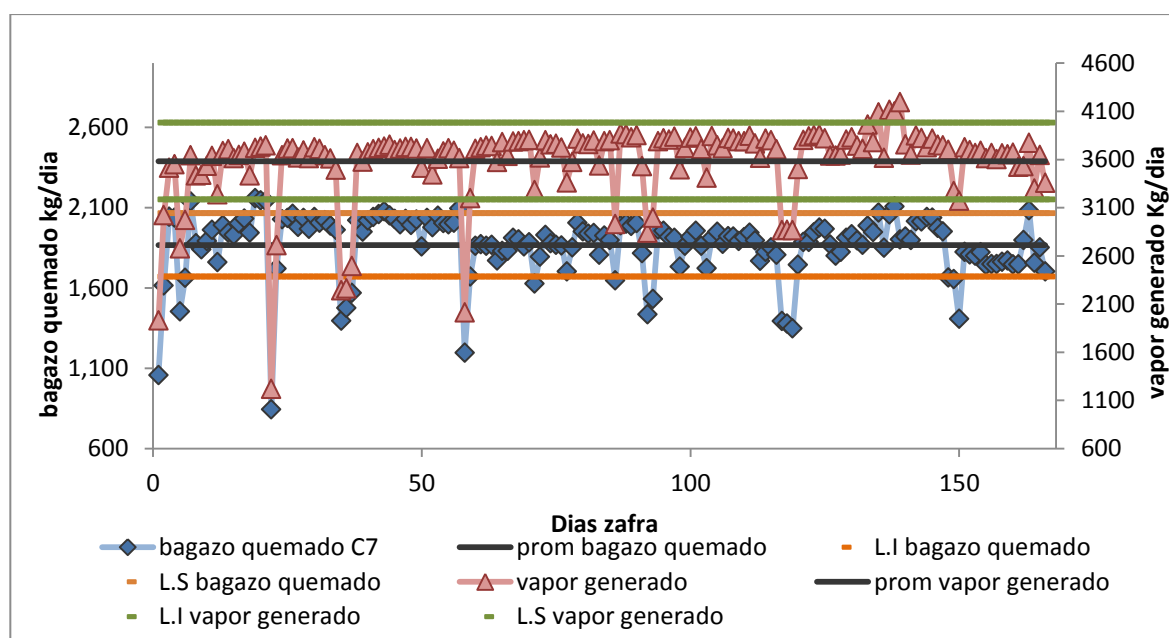


Fig. 5.6 Comportamiento del bagazo quemado (kg/día) vs vapor generado (kg/día) caldera No. 7.

Tabla 5.4 Desviación estándar del bagazo quemado y vapor generado de las figs. 5.5 y 5.6.

Figura	σ (bagazo quemado kg/día)	σ (vapor generado kg/día)
5.5	132	265
5.6	197	398

En las figs 5.5 y 5.6 se puede observar que si hay un aumento o disminución en la cantidad de bagazo quemado, se afecta directamente al vapor generado que tiene una relación promedio de 2kg de vapor por 1kg de bagazo. Los días en que se observa una caída de alimentación de bagazo, como consecuencia en la producción de vapor (la cual está fuera de los límites de control), hubo paro programado en los molinos. Esto implica que las calderas operaron con el mínimo de alimentación, o sea con bagazo apilado del patio, el cual se utiliza como alimentación alternativa en estos casos. Fuera de estos días, las oscilaciones de los parámetros descritos se encuentran dentro de los límites de control, lo que indica una relación entre sí. Como análisis estadístico, los parámetros presentes son aceptables ya que su desviación estándar es casi un 10% lo cual significa que es mucho más pequeña que su magnitud promedio de bagazo quemado por día de la misma forma se comporta el vapor generado.

5.2 Análisis del proceso de combustión

La reacción de combustión ocurre en el hogar de la caldera cuando se pone en contacto un combustible con el comburente (oxígeno) y en presencia de una energía de activación (ignición).

En las figs. 5.7 y 5.8 representan el comportamiento en porcentaje de exceso de aire versus eficiencia de combustión que ocurre en el hogar para cada una de las

calderas, ya que éste es fundamental para la eficiencia de combustión, aunque no solo depende del exceso de aire pero es determinante al aumento de su eficiencia en condiciones adecuadas dentro del rango de 40 a 60% (de exceso).

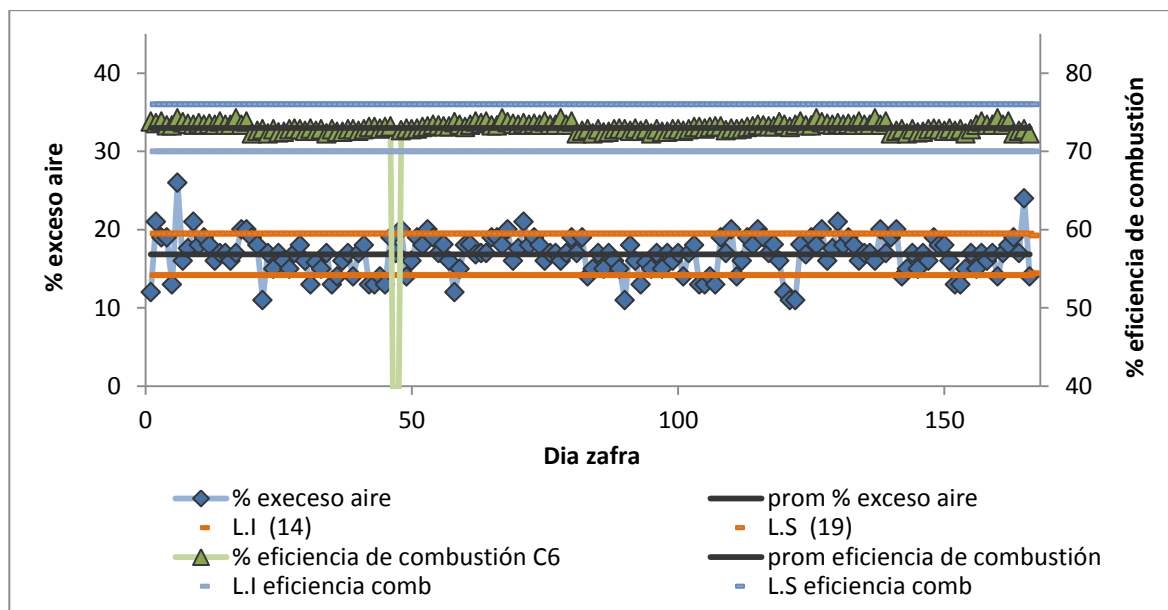


Fig. 5.7 Comportamiento de porcentaje de exceso de aire (%) vs eficiencia de combustión (%) en la caldera No. 6.

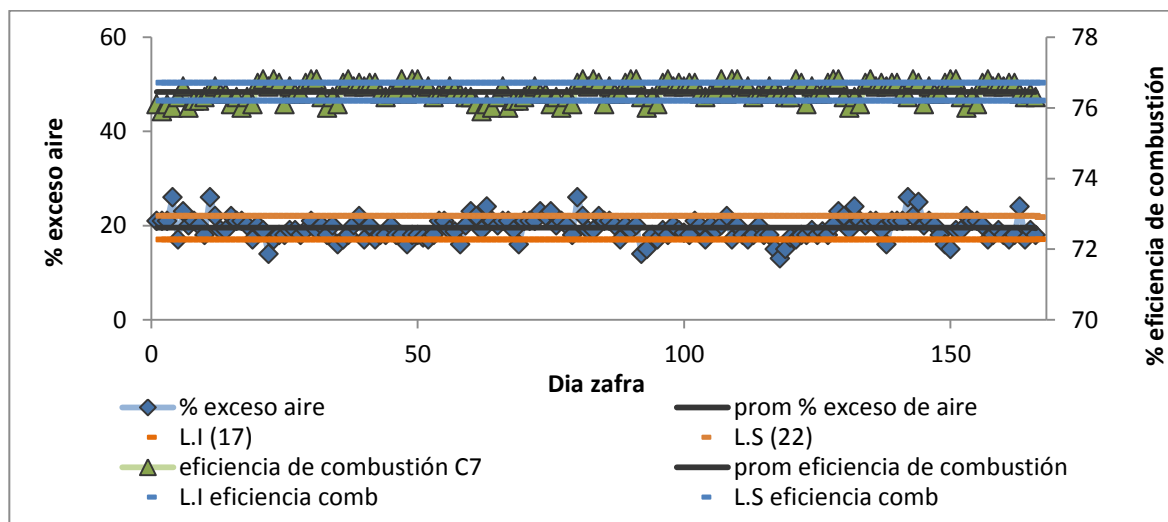


Fig. 5.8 Comportamiento de porcentaje de exceso de aire (%) vs eficiencia de combustión (%) en la caldera No. 7.

Tabla 5.5 Desviación estándar del exceso de aire y la eficiencia de combustión de las figs. 5.7 y 5.8.

Figura	σ (exceso aire %)	σ (eficiencia combustión %)
5.7	2	5
5.8	2	0.25

Para las figs. 5.7 y 5.8, el comportamiento en relación al exceso de aire respecto a la eficiencia de combustión es muy razonable. Las oscilaciones se encuentran dentro del rango o solo varían un poco; para estos parámetros las oscilaciones son simétricas, si el porcentaje de exceso de aire es el apropiado, éste ayudará al aumento del calor de combustión y se tendrá como resultado una reacción de combustión completa. Estadísticamente los valores de eficiencia son aceptables, la desviación estándar son mínimos casi un 4% respecto a su promedio.

Para la fig. 5.7 el comportamiento de la eficiencia en el tiempo es bastante aproximado a su promedio, ya que oscila muy poco por encima y por debajo de su valor, con la única diferencia en el día de zafra 47 cuya eficiencia de combustión es 0. Posiblemente ese día no trabajó la caldera o simplemente fue un error de medición por lo que se descarta ese dato.

Para la fig. 5.8 la eficiencia de combustión es ideal con una desviación estándar del 0.25, lo que indica que los valores son muy aceptables y que la eficiencia de combustión posiblemente es la indicada. Este resultado se produce siempre y cuando los parámetros de exceso de aire introducidos son los apropiados y se reduce el porcentaje de humedad del bagazo.

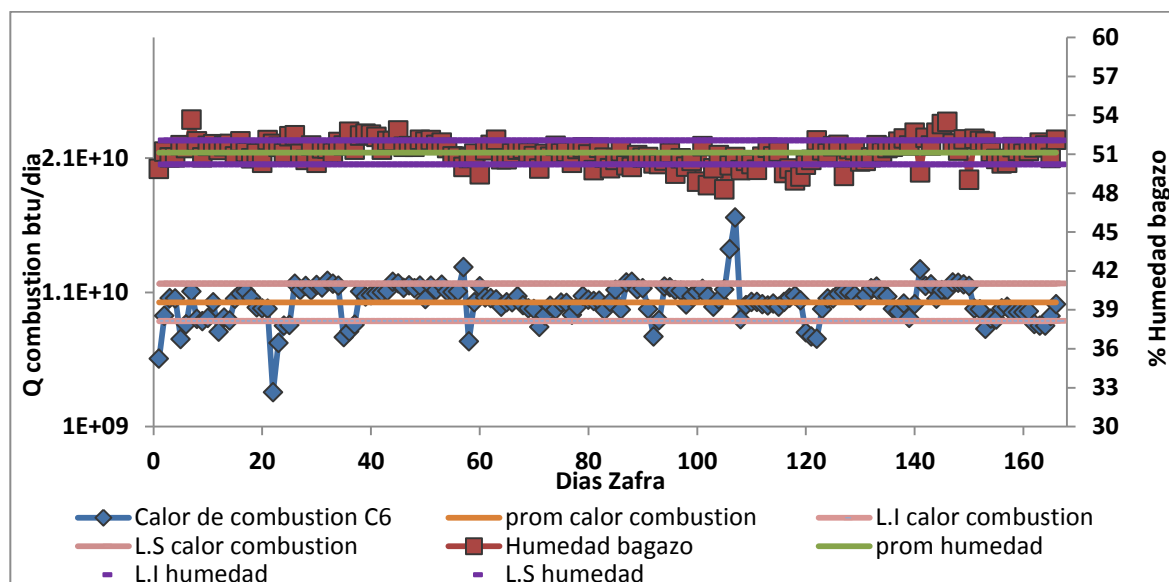


Fig. 5.9 comportamiento del calor de combustión (btu/día) vs la humedad del bagazo (%) en la caldera No. 6.

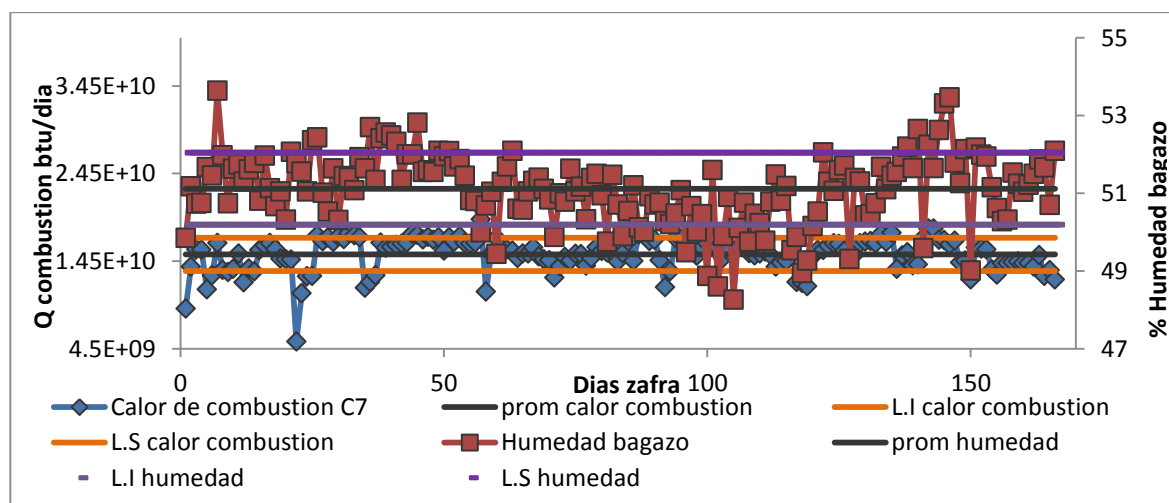


Fig. 5.10 comportamiento del calor de combustión (btu/día) vs la humedad del bagazo (%) para la caldera No.7.

Tabla 5.6 Desviación estándar del exceso de aire y la eficiencia de combustión de las figs. 5.9 y 5.10.

Figura	σ (humedad %)	σ (calor combustión btu/día)
5.9	0.9	$1.4 \cdot 10^9$
5.10	0.9	$1.9 \cdot 10^9$

En las figs. 5.9 y 5.10 se puede observar que la humedad del bagazo incide mucho en el calor disponible para la generación de vapor, esto indica que la combustión experimenta un retraso o se dificulta. La humedad debe ser controlada o reducida térmicamente para no ocasionar caídas de presión y temperaturas en el hogar (Rubio, 2002). El agua (humedad) es un producto de combustión, por lo tanto cuando se tiene un producto de una reacción dentro de los reactivos es un inhibidor, o sea parte del calor disponible es utilizado para evaporar humedad del bagazo que inicialmente posee. Para optimizar esta reacción de combustión se debe tratar térmicamente el bagazo de alimentación con un secador para eliminar humedad, esto no sería de mayor gasto para el ingenio, ya que se puede utilizar un economizador por ejemplo: tomar cierta cantidad de gases de combustión antes de lanzarlos a la atmosfera y ponerlos en contacto a contracorriente en el conductor principal para reducir humedad del bagazo, esto ayudaría en gran parte al aumento del calor de combustión.

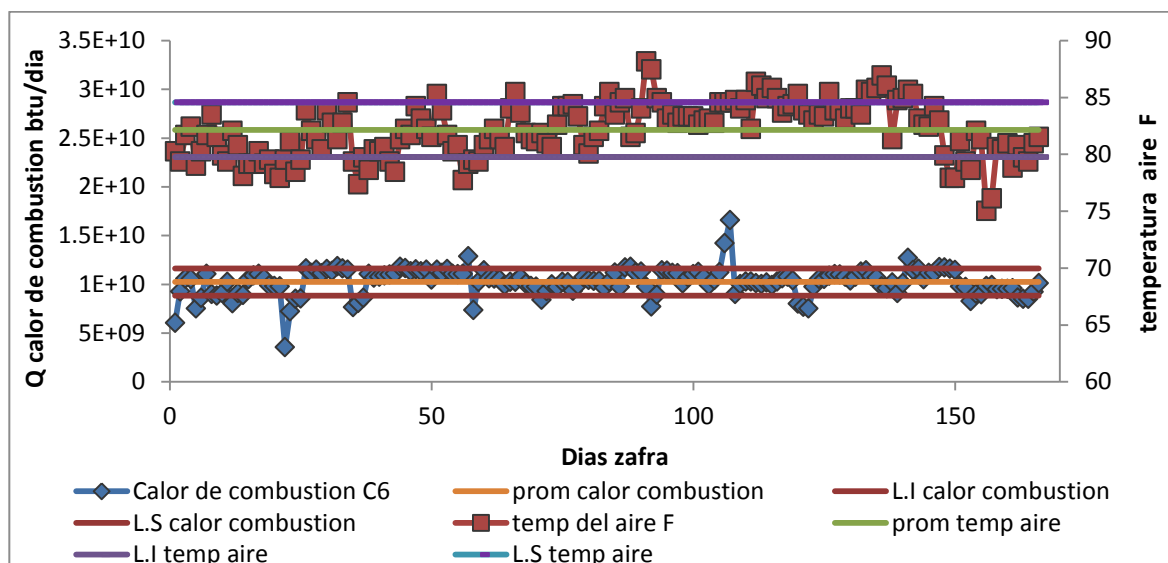


Fig. 5.11 comportamiento del calor de combustión (btu/día) vs temperatura del aire (°F) para la caldera No. 6.

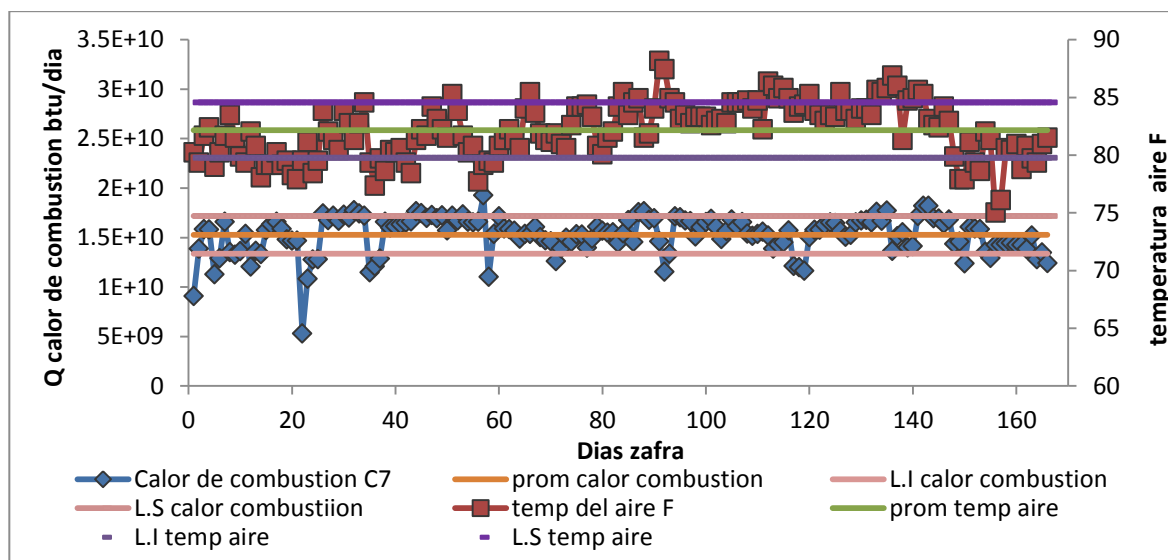


Fig. 5.12 comportamiento del calor de combustión (btu/día) vs temperatura del aire (°F) para la caldera No. 7.

Tabla 5.7 Desviación estándar del calor de combustión y la temperatura del aire de las figs. 5.11 y 5.12.

Figura	σ (temp. Aire °F)	σ (calor combustión btu/día)
5.11	2	$1.4 \cdot 10^9$
5.12	2	$1.9 \cdot 10^9$

En las fig 5.11 y 5.12 las temperaturas del aire son las mismas. Se puede observar lo susceptible que es el calor de combustión a cambios en la temperatura del aire de alimentación. Valores adecuados de la temperatura del aire ayudan a una buena combustión en el hogar de la caldera.

5.3 Evaluación térmica

En la evaluación se presenta la eficiencia térmica para todos los días de zafra 2011-2012 graficados.

El cálculo de la eficiencia térmica es el objetivo principal de la presente evaluación, en la cual los valores obtenidos se consideran aceptables ya que se encuentran dentro del rango de operación de 50 a 66% para calderas acuotubular según Hugot (1986). El proceso de generación de vapor es muy inestable y no todos los valores se encuentran dentro del rango, aunque en su mayoría sí lo están. La inestabilidad observada se debe a la falta de control de la humedad que posee el bagazo de alimentación y de la falta de regulación de la cantidad de aire introducido al hogar de la caldera. Para dar una solución permanente se sugiere la instalación de dispositivos capaces de controlar estos parámetros. Mejorando estas condiciones la eficiencia térmica aumentara considerablemente.

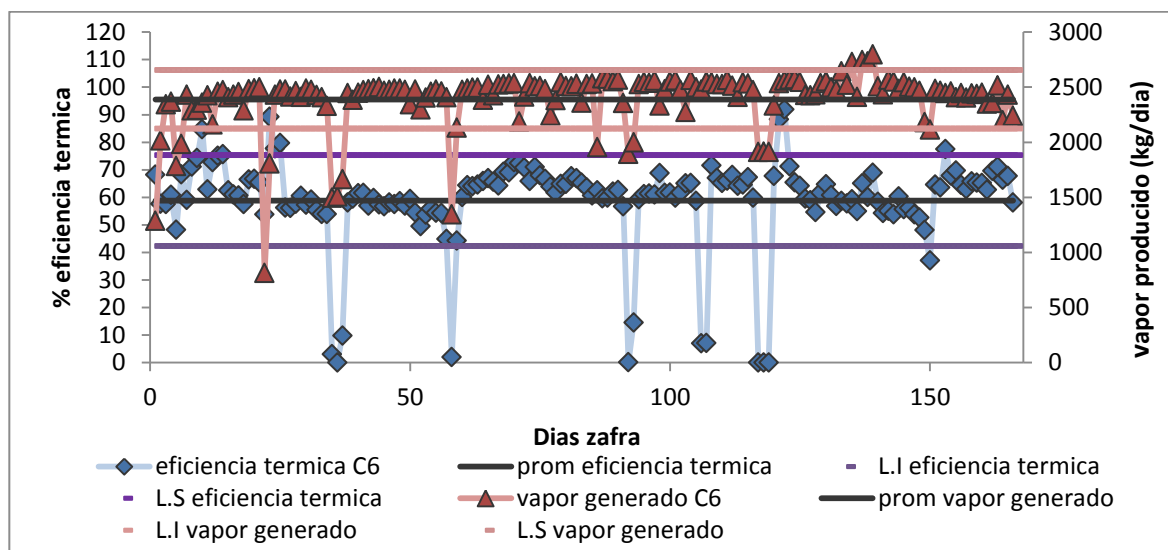


Fig. 5.13 Comportamiento del porcentaje de eficiencia térmica vs vapor producido (kg/día) para la caldera No. 6.

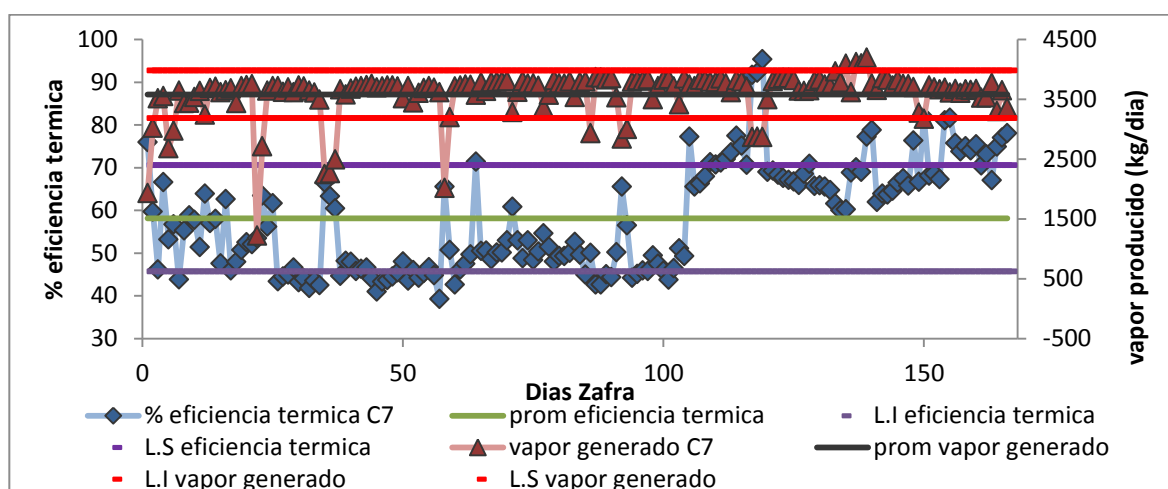


Fig. 5.14 Comportamiento del porcentaje de eficiencia térmica vs vapor producido (kg/día) para la caldera No. 7.

Tabla 5.8 Desviación estándar de la eficiencia térmica y el vapor producido de las figs. 5.13 y 5.14.

Figura	σ (eficiencia térmica)	σ (vapor generado kg/día)
5.13	16	256
5.14	12	398

En la fig. 5.13, en los días de zafra la eficiencia en la caldera fue mínima se encontraba por debajo del límite inferior. De igual forma, la tasa de generación de vapor muestra un comportamiento similar, lo cual indica que posiblemente trabajó al mínimo de alimentación de bagazo. En la fig. 5.14, los días 26 al 60 y del 87 al 100 la eficiencia se encuentra por debajo del límite inferior, con un patrón similar en la generación de vapor.

Para ambas calderas se debe mejorar la eficiencia térmica aunque estén dentro de los límites de control aceptados. Su desviación estándar es casi 20% del promedio, lo que indica que estadísticamente son aceptables para la operación, pero se debe mejorar este parámetro, es necesario cerrar sus límites de control al mínimo para que este proceso alcance una estabilidad óptima. Esto ocurrirá si se mejoran las condiciones operacionales de las calderas, descritas en la sección 3.4.1 (Industrial Tijuana, 2012; Spirax Sarco, 2012).

Del día 106 en adelante se mejoró la eficiencia térmica, por lo tanto la generación de vapor. Esto fue debido a que se incorporó al área de generación de vapor un analizador de gases, el cual ayudo mucho en la regulación del aire versus bagazo en las calderas.

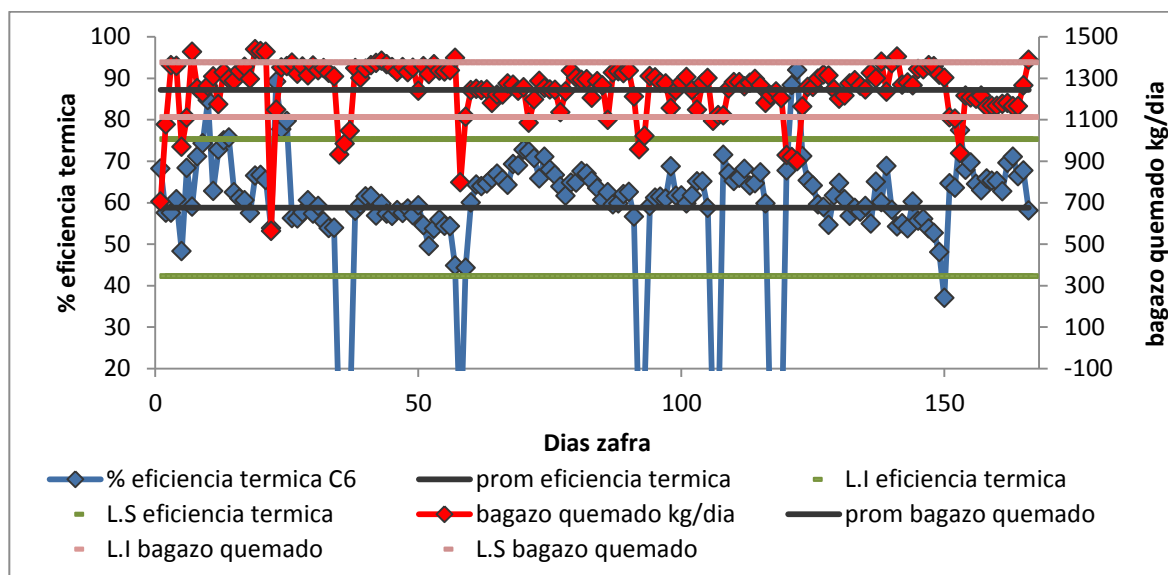


Fig. 5.15 comportamiento de la eficiencia térmica vs bagazo quemado (kg/día) para la caldera No. 6.

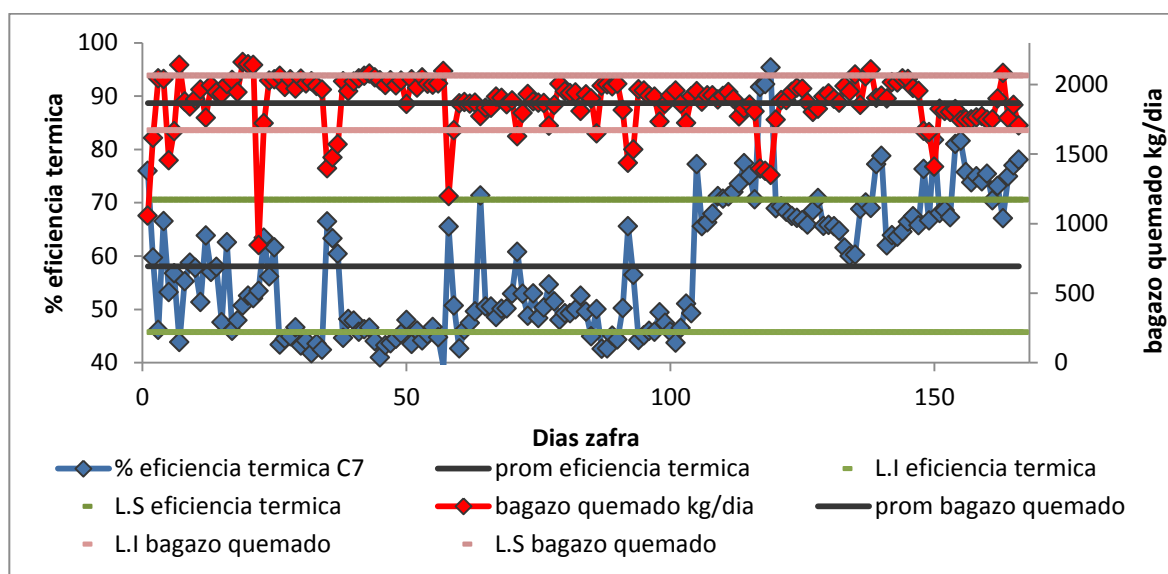


Fig. 5.16 comportamiento de la eficiencia térmica vs bagazo quemado (kg/día) para la caldera No. 7.

Tabla 5.9 Desviación estándar de la eficiencia térmica y bagazo quemado de las figs. 5.15 y 5.16.

Figura	σ (eficiencia térmica)	σ (bagazo quemado kg/día)
5.15	16	132
5.16	12	197

En las figs. 5.15 y 5.16 se observa que el patrón del comportamiento de la eficiencia térmica y la cantidad bagazo quemado son similares. No obstante, en ciertos casos el patrón presenta tendencias opuestas. Esto se puede explicar que aunque su alimentación fue mínima, los parámetros como porcentaje de exceso de aire, temperatura del aire y humedad del bagazo fueron los adecuados para la combustión, por lo tanto su eficiencia fue excelente.

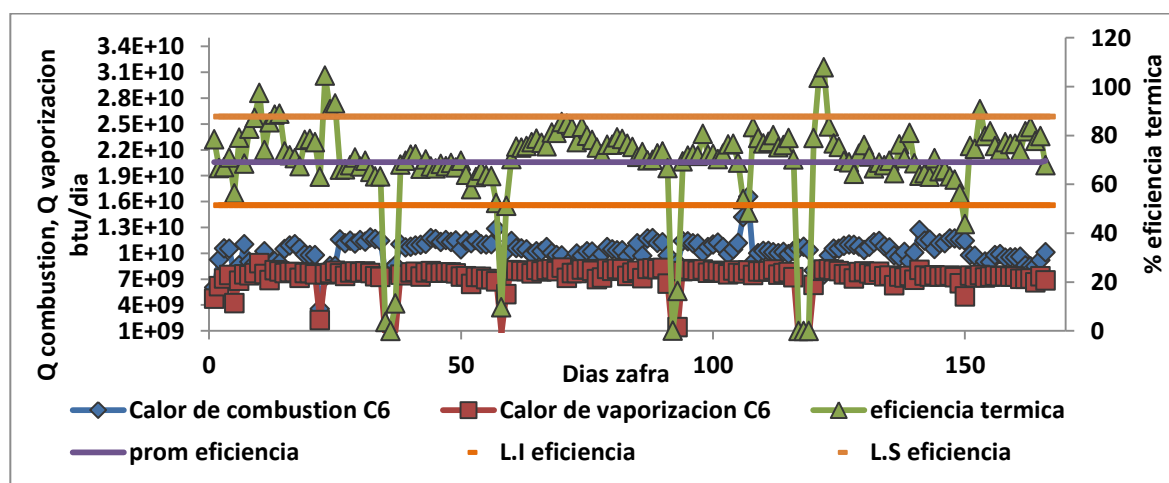


Fig. 5.17 comportamiento del calor de combustión y calor de vaporización (btu/día) vs eficiencia térmica para la caldera No. 6.

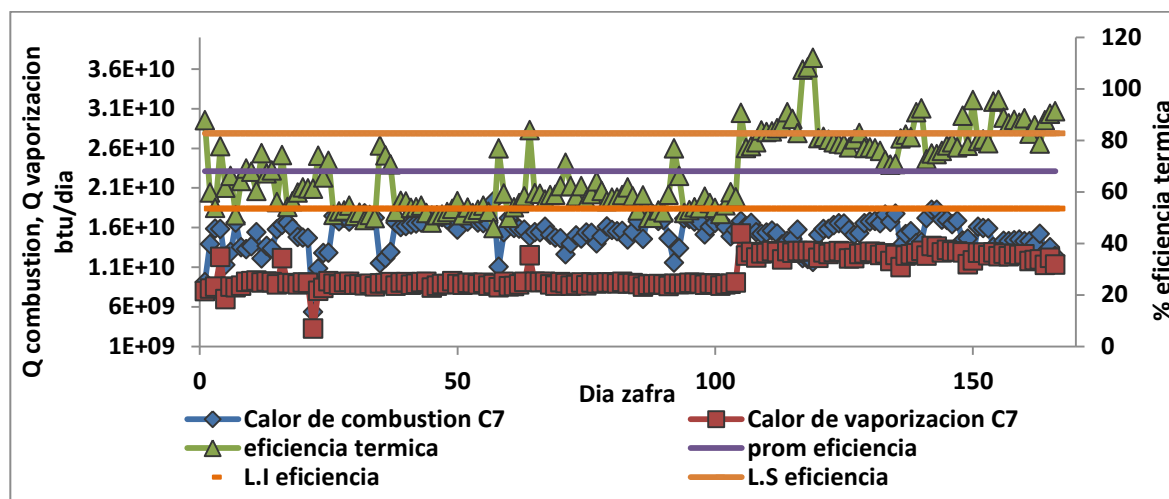


Fig. 5.18 comportamiento del calor de combustión y calor de vaporización (btu/día) vs eficiencia térmica para la caldera No. 7.

Tabla 5.10 Desviación estándar del calor de combustión, de vaporización y de la eficiencia térmica de las figs. 5.17 y 5.18.

Figura	σ (calor combustión btu/día)	σ (calor vaporización btu/día)	σ (eficiencia térmica %)
5.17	$1.4 \cdot 10^9$	$1.7 \cdot 10^9$	16
5.18	$1.9 \cdot 10^9$	$1.9 \cdot 10^9$	12

En las figs. 5.17 y 5.18 se observa una relación directa del calor de vaporización con la eficiencia térmica, ya que es el calor necesario para evaporar el agua que se encuentra en el domo de la caldera. Los días 22, 58, 92 y 120 para la caldera No. 6 y el día 22 para la No. 7 no se alcanzaron valores dentro de los límites del calor de vaporización, por lo tanto la eficiencia fue mínima. Estadísticamente los valores son aceptables ya que la mayoría se encuentran dentro de los límites de control.

En la fig. 5.18, en los primeros $\frac{2}{3}$ de la zafra se observa que no se aprovechó adecuadamente la energía generada en la caldera, luego en el último $\frac{1}{3}$ de zafra,

la energía se aprovechó al máximo, lo cual ayudó al aumento de la eficiencia térmica. Posiblemente en este tramo las condiciones de humedad del bagazo y exceso de aire fueron los apropiados para la combustión.

En las figs. 5.17 y 5.18 el calor de combustión versus el calor de vaporización oscilan con un comportamiento similar. Sin embargo, la brecha que se observa entre ambos calores y la variación similar en su tendencia con el tiempo, indica que podría mejorarse el aprovechamiento del calor de combustión, mediante la regulación del exceso de aire, la humedad del bagazo y la mejora del aislamiento térmico. Esto ayudaría a cerrar la brecha entre los calores de combustión y evaporización reflejada en las figs. 5.17 y 5.18. Se puede observar que a partir del día 106 en adelante de zafra, hubo un incremento en el calor de vaporización, por lo tanto la cantidad de vapor generado aumentó. Es importante destacar que esto se debe a que con ayuda del analizador de gases, se comenzó a regular el exceso de aire requerido de acuerdo a la cantidad de bagazo, lo cual indica que el uso continuo del analizador de gases garantiza una alta eficiencia más consistente en el tiempo.

5.4 Resultados del balance de materia y energía para los calentadores No.2 y No.3

Tabla 5.11 resultados del balance de materia y energía calentador No.2

Flujo No.	F1	F2	F3	F4	F5	F6
Flujo másico w(lbm/h)	6980	4,642	11610	11610	299376	299376
Entalpia h(btu/lbm)	1188.581	1191.91	En el flujo #3 es el punto de mezcla	1189.912	255.910	289.080
Presión p(psi)	1077.87	995.951		110.31	54	87
Temperatura t(°F)	555.57	548.6		338	286.5	318.64

Tabla 5.12 resultados del balance de materia y energía calentador No.3

Flujo No.	F1	F6	F7	F8
Flujo másico w(lbm/h)	6980	299376	6968	299376
Entalpia h(btu/lbm)	1188.581	1185.38872	1091.678	1186
Presión p(psi)	1077.87	87	2488	96.16
Temperatura t(°F)	555.57	318.64	668	320.82971

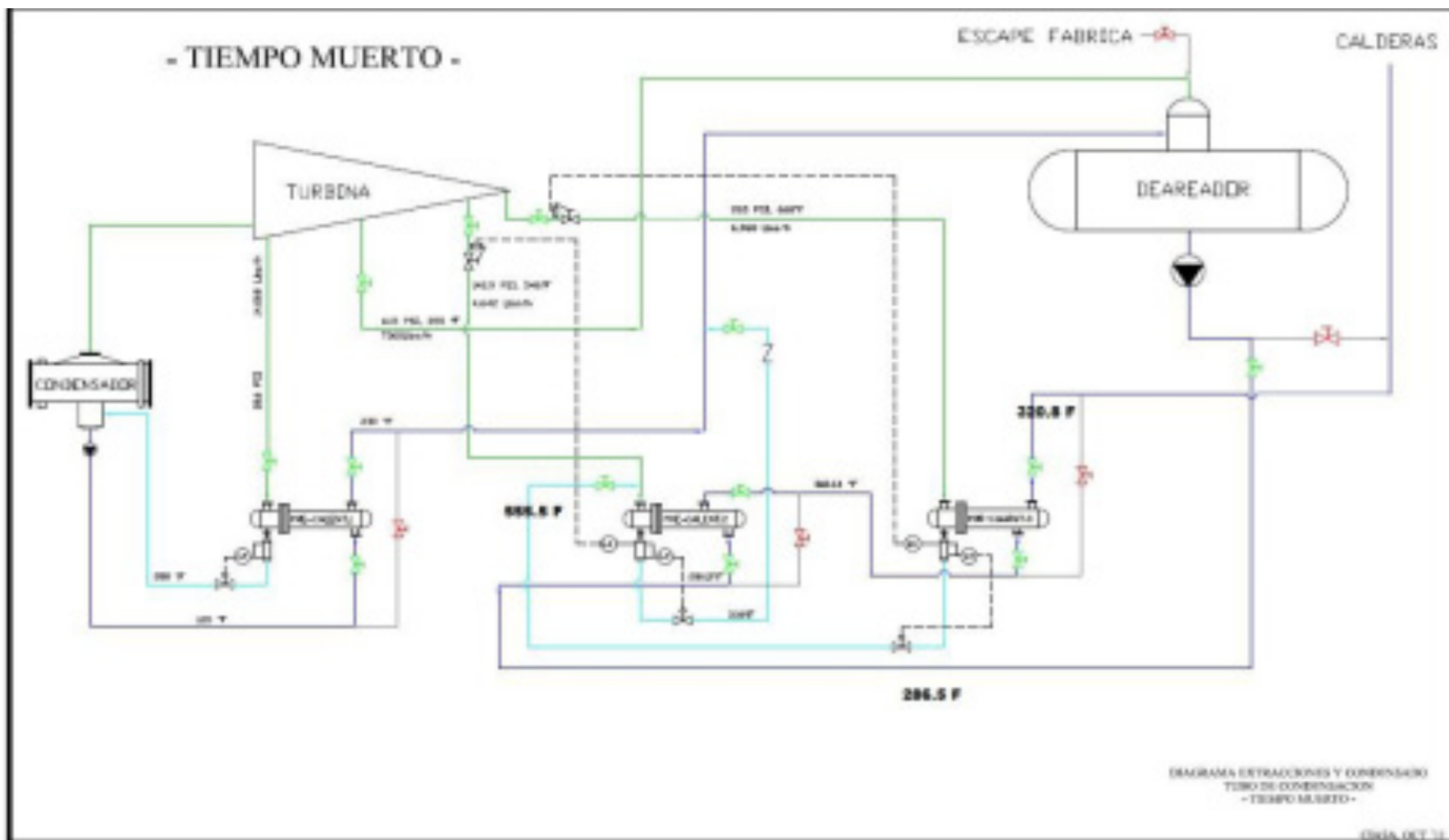


Fig 5.19 Diagrama de tiempo muerto de los calentadores No. 2 y No. 3 para la cogeneración 2011-2012

En el diagrama de tiempo muerto se calculó las temperaturas y flujos másicos de entradas y salidas de los calentadores, con la ayuda de los balances de materia y energía con las ecuaciones (3.20, 3.21, 3.35, 3.36, 3.38, 3.39, 3.40 y 3.41), (Himmelblau, 1997; Felder, 2004).

Para este cálculo se contaba con los flujos F2, F3, F4, F5, F6 Y F7 con sus respectivas condiciones, por lo que se procedió a calcular los flujos F1 y F8 que no estaban dentro del Diagrama de tiempo muerto. Este cálculo fue el indicado ya que los calentadores trabajaron bajo estas condiciones. Los datos calculados que se encuentran en las tablas 5.11 y 5.12, se tomaron como referencia para el proceso durante toda la cogeneración 2011 - 2012. Los valores oscilaban alrededor de estos y fueron de gran ayuda para el ingenio en este período, ya que aumentó la temperatura y presión del vapor, que normalmente disminuyen con respecto a las condiciones de zafra, debido a que la alimentación de bagazo es menor.

VI. Conclusiones

El Ingenio Monte Rosa cuenta con un sistema de control automático actualizado, casi completo para el proceso de generación de vapor. Posee algunas deficiencias, éstas por falta de dispositivos que deberían de estar instalados en ambas calderas, que tienen como finalidad la optimización del proceso.

Los valores obtenidos de los parámetros que influyen en el proceso de generación de vapor, fueron de gran ayuda para la realización de la presente evaluación tecnológica, por lo que fue necesario hacer un análisis de combustión, calcular cantidad de aire, gases de salida, calor de combustión, vaporización y eficiencia térmica para ambas calderas.

Se calcularon parámetros que el ingenio no posee los cuales están incluidos en este documento, que son de mucho apoyo para dicha evaluación como: la cantidad de aire y gases de combustión. Este cálculo se llevó acabo según Hugot (1986).

La eficiencia térmica a pesar que poseen valores aceptables oscilando entre 50 y 66% para calderas acuotubular, se puede mejorar reduciendo la brecha de los límites de control, eliminando parcialmente la humedad del bagazo, ya que tiene un 51% en promedio total y éste con solo que aumente una unidad, como consecuencia produce caídas de presión y temperaturas en el hogar. Esto podría mejorar con un sistema de secado aprovechando la energía del ingenio y regulando adecuadamente el exceso de aire que se les introduce a las calderas, que actualmente lo toman como si se estuviese quemando combustibles líquidos, entre 20 a 40% de exceso de aire y para solidos debe de ser entre 40 a 60% el apropiado de acuerdo a Hugot (1986).

Los calentadores instalados para la cogeneración 2011 - 2012 fueron de gran ayuda para el Ingenio Monte Rosa, estos ayudaron al aumento de la temperatura del agua de alimentación de las calderas, que por ende incrementa la eficiencia térmica. Los valores obtenidos por balance de materia y energía fueron los correctos para la operación y utilizados como referencia para el proceso de calentamiento de agua en este período.

Como resultado del estudio (período de zafra del 27 de febrero al 13 julio del 2012), el vapor producido de las calderas No. 6 y No. 7 es suficiente para abastecer los turbos generadores para la producción de energía eléctrica y luego enviar vapor vivo a la fábrica de azúcar, lo cual solventa el 100% de la energía eléctrica y térmica requerida por el ingenio, y además le permite poder vender cierto porcentaje de energía eléctrica. En cuanto a los porcentajes específicos de energía eléctrica distribuida por el ingenio, esa información está restringida. Se espera que tomando en consideración las recomendaciones siguientes, esta relación de producción y consumo de energía térmica solo puede cambiar para mejorar.

VII. Recomendaciones

Con los resultados obtenidos en la evaluación tecnológica de las calderas No. 6 y No. 7 del Ingenio Monte Rosa y siendo los equipos principales para la generación de vapor se determinó las siguientes recomendaciones:

- Mantener la cantidad apropiada de exceso de aire para poder obtener una combustión completa o sea dentro del rango de 40 a 60% para combustibles sólidos, el cual esté determinado a partir del aire teórico necesario para combustionar, esto podría aumentar considerablemente la eficiencia térmica para ambas calderas.
- Instalar sensores o instrumentos capaces de medir la cantidad de aire que se le introduce al hogar de la caldera, así se podrá controlar mejor los parámetros para obtener una mejor combustión del bagazo.
- Instalar sensores o instrumentos capaces de medir la cantidad de gases de combustión que salen por la chimenea, con este parámetro se podrá controlar las cantidades de dióxido de carbono, agua, nitrógeno, oxígeno y ceniza que se producen en la combustión y los cuales son expulsados al ambiente.
- Instalar un opacímetro en la chimenea para medir la cantidad de hollín lanzado en los gases de la combustión, la cual no puede ser cuantificada por un analizador de gases.
- Tratar térmicamente el bagazo de alimentación de la caldera, posee demasiada humedad, por lo que se recomienda la instalación de un secador descrito en la sección 5.9 y 5.10.

- No sobrecargar la capacidad de trabajo de las calderas, ya que minimiza su vida útil y también se corre el riesgo a producir fugas o cualquier otro inconveniente en ellas y esto podría afectar directamente a sus operarios.
- Proporcionar el equipo de protección personal adecuado para cada uno de los trabajadores, ya que es una área de mucho peligro por sus altas temperaturas de vapor y de combustión al igual por la presión de trabajo que poseen los equipos.

VIII. Nomenclatura

Caracteres latinos

Símbolo	Significado	Unidades (Ingles- Internacional)
C_p	Capacidad calorífica	[btu/Lb °F] - [KJ/Kg°k]
H_a	Entalpia de agua	[btu/lbm] - [kJ/mol]
H_v	Entalpia de vapor	[btu/lbm] - [kJ/mol]
m	Exceso de aire	[%]
m_{as}	Masa de aire seco	[Lb ah/ Lb B] - [kg ah/ kg B]
m_B	Masa de bagazo	[lbm / dia] - [kg/dia]
m_v	Masa de vapor	[lbm / dia] - [Kg/dia]
m_{co2}	Masa de dióxido de carbono	[Lb/Lb B]- [kg / kg B]
m_{H_2O}	Masa de agua	[Lb/Lb B]- [kg / kg B]
m_{O_2}	Masa de oxígeno	[Lb/Lb B]- [kg / kg B]
m_{N_2}	Masa de nitrógeno	[Lb/Lb B]- [kg / kg B]
ΔH	Variación de la entalpía	[btu / lb] - [KJ / Kg]
Δt	Variación de la temperatura	[°F] - [°K]
T	Tiempo	[s]
p	Presión del sistema	[psi]-[Pa]
P_{cB}	Poder calórico del bagazo	[btu / lbm] - [Kj / Kg]
P_g	Peso total de gases de combustión	[Lb/Lb B]- [kg / kg B]
U	Energía interna	[btu] - [J]
Q_a	Calor absorbido	[btu / h] - [KJ / H]
Q_c	Calor cedido	[btu / h] - [KJ / H]
Q_l	Calor latente	[btu / h] - [KJ / H]

Q_s	Calor sensible	[btu / h] - [KJ / H]
Q_t	Calor total	[btu / h] - [KJ / H]
Q_{ut}	Calor útil	[btu / h] - [KJ / H]
Q_{ap}	Calor aportado	[btu / h] - [KJ / H]
Q_{pr}	Calor perdido	[btu / h] - [KJ / H]
Q_c	Calor de combustión	[btu / h] - [KJ / H]
Q_{vap}	Calor de vaporización	[btu / h] - [KJ / H]
V_a	Volumen de aire seco	[ft ³ / Lb B] - [m ³ / kg B]

Símbolos	Significado	Unidades
----------	-------------	----------

Caracteres griegos

ω	Humedad del bagazo	[%]
ω_{abs}	Humedad absoluta	[Lb H ₂ O / Ft ³] - [kg H ₂ O / m ³]
ε	Ceniza	[Lb/Lb B]- [kg / kg B]
σ	Desviación estándar	[%]

IX. Bibliografía

A. F. Mills, Transferencia de Calor, Editorial McGraw Hill, Colombia 1999.

Avellan Ernesto, Evaluación Energética en la Planta de Solventes (FENIX) Refinería ESSO Managua. (Monografía UNI), Nicaragua 2008.

Annaratone, E. Steam Generators, Spreinger Verlag Press, México 2008.

Carl D. Shield, Calderas: Tipos, Características y Funciones, Decimosegunda impresión, Editorial Mc Graw Hill, México Marzo 1987.

Cruz Fonticiella, O. Plantas de Vapor, Universidad Veracruzana, México 2008.

CDEM, Manual de Sistema de Combustión de calderas de vapor. Nicaragua 2005.

CALDEMA, Manual de Instrucciones para Operación y Mantenimiento Caldera AUP-40-5GI-PSE. Año 2000.

Felder, Richard M. Principales elementos de los Procesos Químicos tercera edición, editorial Limusa Wiley, México 2004.

Himmelblau, David. M, Principios Básicos y Cálculos de Ingeniería Química Sexta Edición, Editorial Prentice- Hall, Inc. México 1997.

Danilin Oscar. Ingeniero, La Combustión y sus propiedades. Universidad tecnológica nacional, argentina 1999.

Kern, Donald Q. Procesos de Transferencia de Calor. Trigésima Primera Reimpresión. Editorial McGraw Hill, México 1999.

E. Hugot, Handbook of Cane Sugar Engineering, Thrid edition Amsterdam 1986.

ICAITI, Ahorro de energía en sistemas de vapor, Instituto Centroamericano de Investigación y tecnología industrial.

INE, Instituto Nicaragüense de Energía, Dirección de Recursos Humanos, Combustión y Sopladores de Hollín, Nicaragua septiembre 1993.

López Evangelina, Evaluación Tecnológica de los Hornos 4 y 5 Instalados en la Compañía Nacional Productora de Cemento (CANAL). (Monografía UNI), Nicaragua 2000.

METRAL CLAUDE; SERMATEC, Manual de Instrucciones para Operación y Mantenimiento Caldera PROYECTO MONTE ROSA-CALDERA HPB VS-5150/2 – Año 2003.

Monte Rosa Ingenio, Informes técnicos medición de eficiencia (analizador de gases), 2012.

Holman. J. P. Transferencia de calor, octava edición, Editorial McGraw Hill, España 1998.

Pérez Rodríguez, José. Fundamentos de hornos y combustibles. Segunda edición. Editorial pueblo y educación. Habana Cuba, 1982.

Rubio González A.M, Generadores de Vapor, ENPES, 2002, UCLV.

Sonntag Richard E, Introducción a la Termodinámica Clásica y Estadística. Limusa Noriega Editores. España 1997.

Smith, Van Ness, Introducción a la Termodinámica en Ingeniería Química, Quinta Edición. Editorial McGraw Hill, México 1997.

VerlagBartens AlbertDr, Energy Manual for Sugar Factories, 2nd edition. Berlin 1995.

Woodruff, E, Lammers, E, Steam Plant Operation, Mc Graw Hill, México 2000.

Comunicación personal Ing. Juan Eduardo Contreras, Sr. Ronald Ulloa, Ing. Luis Moisés Avellan, Ing. Tomas Cano y Sr. Rene Dávila. 2012.

Sitios Web Visitados

Portal de productos y servicios para generadores de vapor, visitado marzo 2012
Www.spiraxsarco.com/ar - E-mail: info@ar.SpiraxSarco.com.

Tablas de termodinámica on line proporcionadas por SpiraxSarco, España, visitado marzo 2012,

<http://www.spiraxsarco.com/es/resources/steam-tables/saturated-water.asp>.

Portal de mantenimiento proactivo y predictivo para calderas, visitado abril 2012,
Www.industrialtijuana.com- E mail: mantenimiento@industrialtijuana.com.

APENDICE A

Tablas y figuras que consolidan el marco de referencia y
metodología

INFORMACION GENERAL DEL INGENIO MONTE ROSA

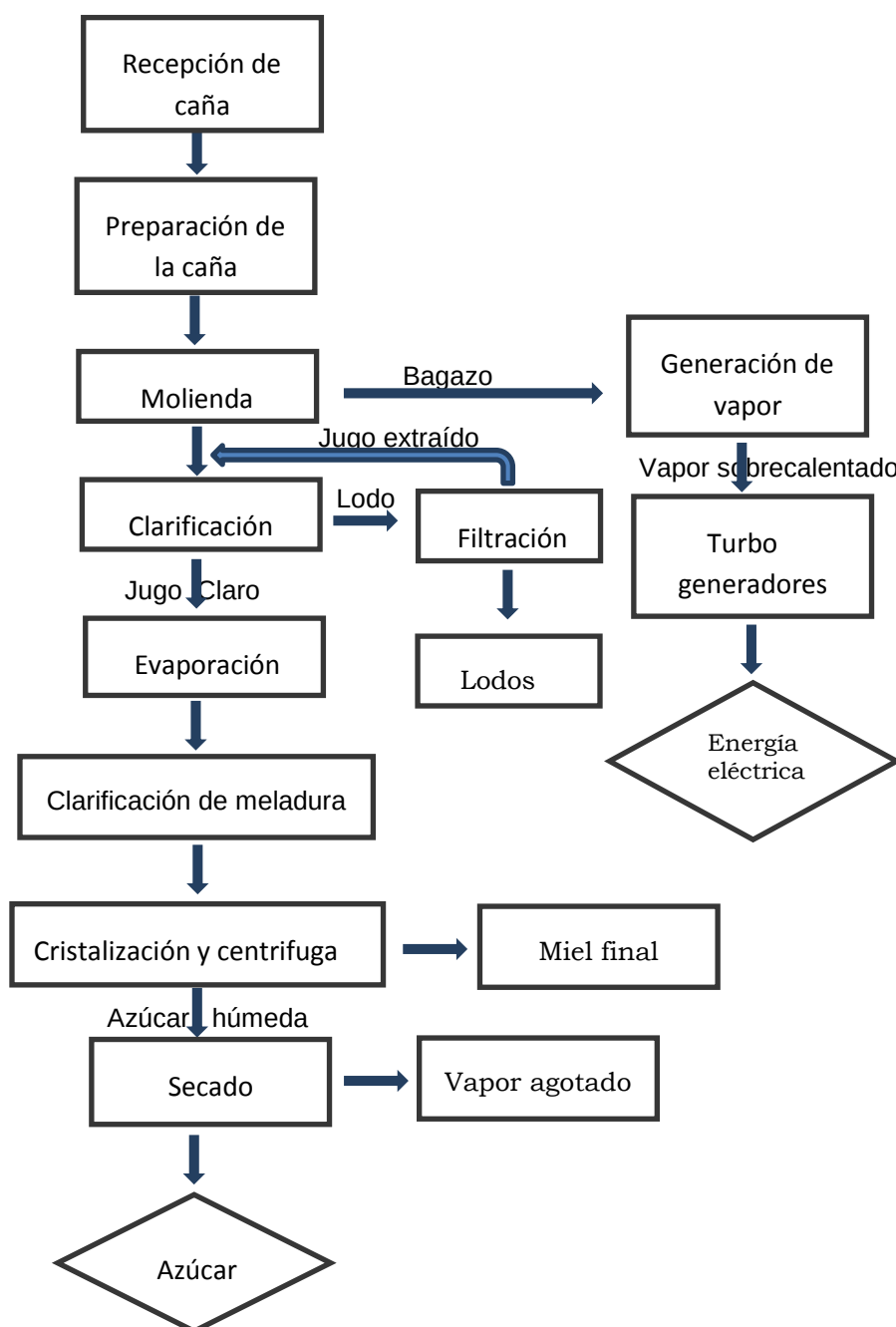


Fig. A.1 Flujograma del proceso azucarero.

Tabla A.1 Composición química del bagazo de autores citados por Hugot, 1986.

	N. Deerr (pag.455)	Tromp (ISJ, 1938, pag.175)	Kelly (FAS, 1939, pag.69)	V.M* (ISJ, 1939, pag.69)	Davies (ISJ,1947, pag.103)	Gregory (FAS, Dic.1944, pag.26)
Carbono C	46.5	44	48.5	47.5	47.9	49
Hidrogeno H	6.5	6	6	6.1	6.7	7.4
Oxigeno O	46	48	43.3	44.4	45.4	41.8
Cenizas ε	1	2	2.2	2	-	1.8
Total	100	100	100	100	100	100

Tabla A.2 Valor calorífico superior del bagazo seco de autores citados por Hugot, 1986.

Autor	País	Referencia	V.C.S del bagazo seco	
			kcal/kg	btu/lb
Behne	Queensland	ISJ,(1935) Pag. 160	4,542	8,177
Hedley	Sudáfrica	ISJ,(1936) Pag.349	4,585	8,253
¿?	Hawaii	ISJ,(1946) Pag. 126	4,622	8,320
Gregory	Cuba	FAS,(Dic. 1944) Pag.26	4,691	8,444
Gregory	Puerto Rico	FAS,(Dic. 1944) Pag. 26	4,594	8,270
Medio			4,607	8,293

Tabla. A.3 Valor calorífico de los componentes del Bagazo (Verlag, 1995).

Componentes %		V.C	
		kcal/kg	Btu/lb
Fibra	F	4,600	8,280
Azúcar	s	3,955(≈4,000)	7,120
Agua	w	0	0

Composición del aire

Tabla. A.4 Composición del aire seco (Danilin, 1999).

	% en peso	% en volumen
Oxígeno	23.15	20.84
Nitrógeno y gases inertes	76.85	79.16

Tabla.A.5 Escala de colores de la temperatura (Woodruff, 2000)

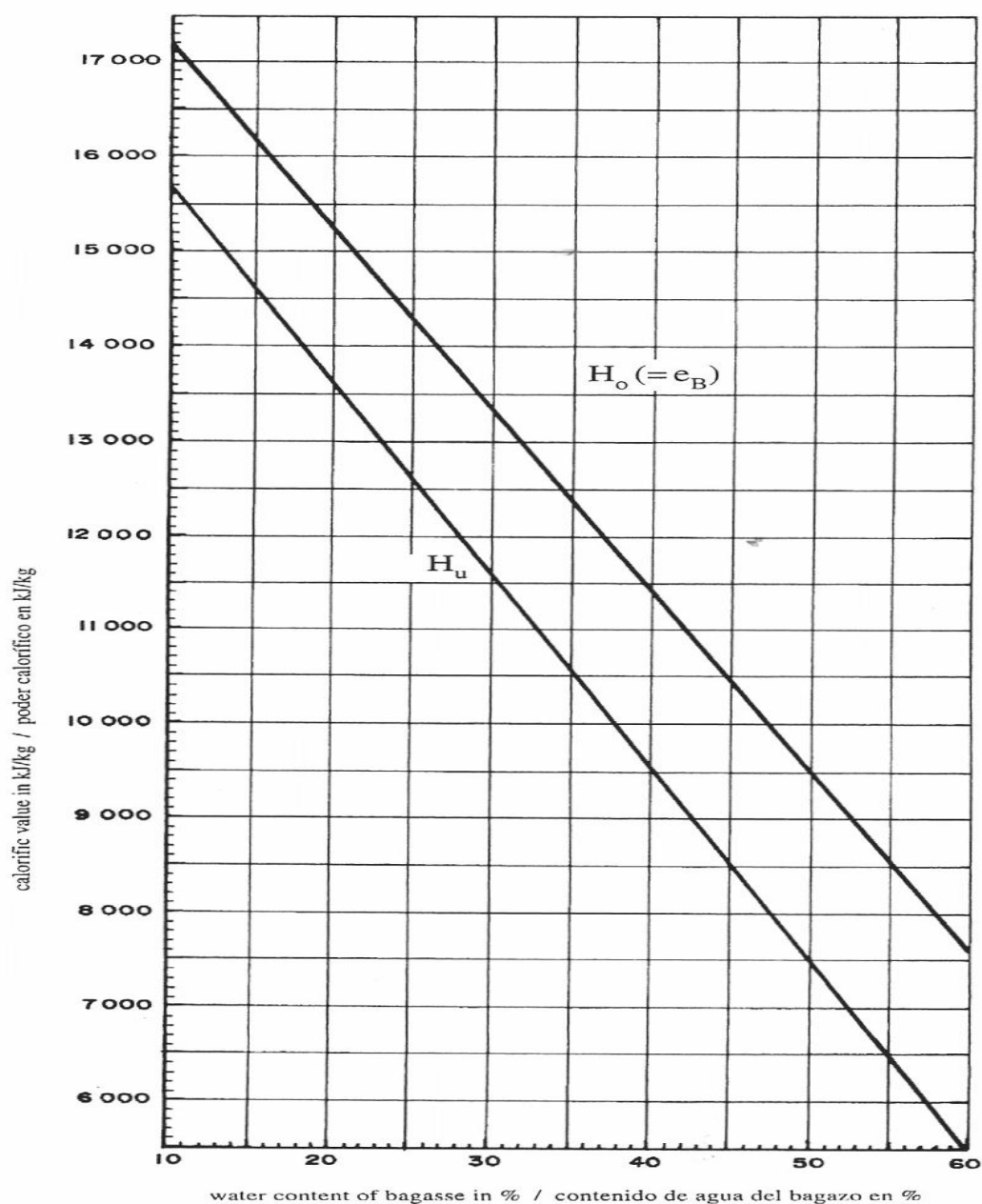
Color de la llama	°C	°F
Blanco brillante	1500	2700
Blanco de soldadura	1400	2500
Blanco	1300	2400
Amarillo paja	1200	2200
Amarillo claro	1150	2100
Amarillo oro	1100	2000
Anaranjado	1050	1900
Rojo cereza brillante	1000	1800
Rojo cereza	900	1650
Rojo cereza naciente	800	1500
Rojo oscuro	650	1200

Tabla. A.6 Propiedades del agua (Spirax sarco, 2012)

Temperatura (°C)	Densidad ρ (kg/m ³)	Calor Específico c_p (J/kg°C)
0	999,9	4226
20	998,2	4182
40	992,3	4178
60	983,2	4181
80	971,8	4194
100	958,4	4211
140	926,1	4279
180	887,0	4413
220	840,5	4606
260	784,0	4944
300	712,5	6594

Tabla. A.7 Propiedades del aire (Spirax sarco, 2012)

Temperatura (K)	Densidad ρ (kg/m ³)	Calor específico c_p kJ/kg°C
100	3,6010	1,027
150	2,3675	1,010
200	1,7684	1,006
250	1,4128	1,005
300	1,1774	1,006
400	0,8826	1,014
500	0,7048	1,030
600	0,5879	1,055
700	0,5030	1,075
800	0,4405	1,098
900	0,3925	1,121
1000	0,3524	1,142
1200	0,2947	1,179
1400	0,2515	1,214
1600	0,2211	1,248
1800	0,1970	1,287
2000	0,1762	1,338
2500	0,1394	1,688



H_o : poder calórico alto

H_u : poder calórico bajo

Promedio del poder calórico de toda la zafra es de 8,600 kJ/kg base húmeda.

Fig. A.2 Poder calórico (Hugot, 1986).

APENDICE B

Datos recolectados directamente desde las instalaciones del Ingenio
Monte Rosa zafra 2011 - 2012

Tabla .B.1 Datos de las Calderas No. 6 y No. 7 promedios por día

Día Zafra	FECHA	Presión vapor domo C6	Flujo vapor salida C6	Presión vapor domo C7	Flujo de vapor salida C7	Temp. agua antes del economizador C6	Temp. agua antes del economizador C7	Temp. vapor salida C6	Temp. vapor salida C7
1	22/11/2011	840.22	135.85	746.91	163.96	221.70	222.50	890.67	809.59
2	23/11/2011	886.98	173.01	904.62	285.54	235.52	232.38	954.28	932.12
3	24/11/2011	885.82	199.48	912.83	330.14	243.62	241.77	944.78	945.84
4	25/11/2011	880.69	209.91	907.12	333.86	243.42	244.77	949.13	959.39
5	26/11/2011	697.07	127.03	887.01	296.54	230.51	231.61	765.50	939.61
6	27/11/2011	879.30	191.98	840.41	260.82	233.80	239.33	937.78	904.33
7	28/11/2011	887.30	212.77	912.56	346.80	237.64	236.17	949.55	955.53
8	29/11/2011	891.86	211.62	913.06	322.40	238.66	237.15	921.90	951.41
9	30/11/2011	903.75	217.16	921.89	305.44	251.04	249.90	939.18	938.05
10	01/12/2011	889.60	217.82	907.83	326.67	254.07	254.17	1322.70	949.36
11	02/12/2011	897.26	212.47	924.63	347.57	255.07	253.20	954.66	959.89
12	03/12/2011	868.02	194.24	875.88	301.09	251.59	249.88	933.61	913.86
13	04/12/2011	896.96	226.30	917.70	342.13	257.74	255.68	948.90	955.00
14	05/12/2011	895.73	220.39	919.34	342.34	254.72	254.56	966.40	949.05
15	06/12/2011	899.02	216.38	917.80	337.16	255.43	252.99	954.74	949.25
16	07/12/2011	893.33	219.47	891.26	343.61	254.10	256.61	953.11	947.35
17	08/12/2011	901.67	219.97	923.57	342.76	255.71	254.12	945.28	951.05
18	09/12/2011	891.77	199.65	906.66	327.34	252.24	253.90	959.58	949.53
19	10/12/2011	901.40	215.36	929.55	353.97	254.99	253.62	965.15	955.16
20	11/12/2011	891.63	216.25	922.15	353.23	256.74	252.91	949.98	958.18
21	12/12/2011	877.60	212.63	911.44	362.83	257.39	255.35	943.02	953.96
22	13/12/2011	393.72	71.05	382.08	121.83	225.65	192.04	585.22	511.95
23	14/12/2011	876.81	212.55	575.40	195.05	248.22	218.25	942.13	626.92

24	15/12/2011	887.89	216.61	911.41	363.67	246.23	244.68	954.41	951.68
25	16/12/2011	900.51	222.58	923.81	348.62	246.21	244.96	958.66	957.66
26	17/12/2011	900.81	215.34	927.21	351.74	254.31	253.00	952.18	953.91
27	18/12/2011	888.03	207.45	920.96	352.44	252.46	254.96	945.64	957.76
28	19/12/2011	897.37	219.17	919.54	343.94	253.39	251.65	939.92	954.09
29	20/12/2011	892.20	221.03	908.84	333.69	250.46	248.65	959.78	948.09
30	21/12/2011	887.25	217.92	913.37	353.03	253.57	250.85	955.11	956.48
31	22/12/2011	889.96	220.95	908.79	342.18	256.10	253.96	961.60	948.65
32	23/12/2011	891.78	216.21	918.55	346.48	252.81	250.73	952.34	952.05
33	24/12/2011	895.87	205.62	919.80	333.05	251.71	249.11	959.56	951.33
34	25/12/2011	890.03	202.77	915.83	318.73	252.19	250.66	963.47	952.55
35	26/12/2011	72.52	9.36	912.66	340.35	149.66	249.96	409.83	951.40
36	27/12/2011	52.32	0.00	904.84	347.58	144.32	249.07	229.53	955.29
37	28/12/2011	233.66	33.21	918.47	343.16	188.86	246.19	380.89	954.78
38	29/12/2011	895.99	211.79	922.77	349.54	251.86	249.43	949.65	948.38
39	30/12/2011	887.94	209.26	913.20	351.93	248.35	249.67	944.70	952.54
40	31/12/2011	895.01	217.76	917.46	343.53	251.53	250.15	953.59	947.41
41	01/01/2012	901.99	220.45	928.08	349.17	252.22	250.45	955.75	958.01
42	02/01/2012	860.22	208.02	888.33	338.13	241.71	239.53	911.25	915.81
43	03/01/2012	897.32	218.08	925.68	355.87	253.48	251.39	952.61	959.68
44	04/01/2012	904.68	220.95	930.33	350.24	253.72	251.97	969.09	956.56
45	05/01/2012	895.74	216.61	921.37	354.76	251.23	249.60	962.29	951.10
46	06/01/2012	856.68	222.76	922.24	348.57	253.49	252.00	951.02	955.61
47	07/01/2012	904.27	217.15	928.54	352.67	252.62	249.56	963.74	954.94
48	08/01/2012	900.06	217.02	927.15	354.94	251.83	250.10	962.49	962.14
49	09/01/2012	892.23	215.03	918.53	354.43	253.38	251.93	960.16	957.01
50	10/01/2012	893.58	204.48	916.65	332.63	251.67	249.88	953.28	950.72
51	11/01/2012	887.94	205.51	921.49	366.24	250.45	248.48	956.86	959.51
52	12/01/2012	854.05	181.75	893.28	329.50	248.01	247.38	944.96	941.73

53	13/01/2012	888.72	204.15	921.32	350.72	251.32	249.61	953.06	951.56
54	14/01/2012	875.49	203.54	911.16	363.47	251.12	247.97	952.13	953.28
55	15/01/2012	877.37	196.83	913.75	369.04	249.58	248.11	962.75	963.02
56	16/01/2012	879.78	196.82	919.34	368.84	246.02	243.62	953.76	962.22
57	17/01/2012	874.29	188.93	911.13	355.84	246.63	245.66	954.18	960.34
58	18/01/2012	188.89	24.64	912.24	288.20	158.29	248.15	413.11	927.31
59	19/01/2012	644.94	157.65	921.07	333.63	218.73	247.37	761.89	951.68
60	20/01/2012	911.76	226.70	932.64	342.23	248.85	247.13	940.29	953.24
61	21/01/2012	903.87	224.62	926.70	345.30	250.04	248.55	951.40	954.19
62	22/01/2012	903.25	222.02	925.36	345.70	250.49	248.80	953.94	956.78
63	23/01/2012	900.52	221.97	920.99	349.80	251.30	249.42	955.47	954.63
64	24/01/2012	908.43	214.91	927.95	337.41	251.24	253.28	949.83	952.72
65	25/01/2012	919.52	226.53	937.51	352.35	253.41	252.97	951.08	949.82
66	26/01/2012	887.17	222.06	922.93	346.31	250.77	248.95	943.98	943.68
67	27/01/2012	917.88	227.73	938.10	349.22	253.28	252.01	943.19	956.92
68	28/01/2012	913.36	228.78	934.94	352.42	249.68	248.29	946.80	953.53
69	29/01/2012	902.90	223.35	930.12	359.76	252.51	251.28	946.56	958.25
70	30/01/2012	908.91	233.82	928.71	348.72	253.67	251.61	951.13	948.90
71	31/01/2012	884.40	201.48	926.00	302.90	249.37	248.37	936.58	934.89
72	01/02/2012	913.46	216.67	938.31	337.24	252.56	251.29	947.95	950.24
73	02/02/2012	919.46	223.24	942.88	353.46	251.89	272.88	948.47	954.25
74	03/02/2012	917.99	227.63	938.81	345.28	253.69	251.94	950.14	949.87
75	04/02/2012	918.78	229.01	941.28	350.01	252.68	250.96	952.92	947.63
76	05/02/2012	917.34	224.02	935.84	337.74	250.93	249.83	950.71	947.83
77	06/02/2012	890.05	197.84	923.67	327.82	250.44	247.30	928.94	931.51
78	07/02/2012	909.24	202.66	928.08	330.85	249.45	248.15	933.89	945.11
79	08/02/2012	907.13	230.13	932.61	356.44	253.73	251.58	945.99	958.42
80	09/02/2012	911.24	223.76	937.22	354.36	252.07	249.44	945.90	953.38
81	10/02/2012	906.33	229.64	928.27	345.76	250.73	248.77	952.93	950.78

82	11/02/2012	910.21	227.85	929.98	355.01	252.35	250.25	958.40	948.33
83	12/02/2012	1240.41	208.41	923.20	330.88	251.53	249.49	938.07	939.03
84	13/02/2012	890.36	226.92	912.05	353.99	254.04	252.25	937.86	954.20
85	14/02/2012	911.21	224.31	936.92	355.06	252.93	251.05	942.96	951.47
86	15/02/2012	866.88	202.85	898.82	300.80	245.82	244.25	904.78	916.61
87	16/02/2012	907.47	229.96	934.44	365.18	249.89	248.79	947.97	949.16
88	17/02/2012	908.99	231.94	933.44	362.93	250.14	248.66	948.78	956.32
89	18/02/2012	909.02	228.84	930.89	362.31	249.42	248.34	946.46	948.39
90	19/02/2012	908.33	233.35	930.03	353.83	250.34	248.92	944.29	945.63
91	20/02/2012	847.27	186.35	924.10	367.83	249.89	248.91	893.87	949.20
92	21/02/2012	177.81	0.31	931.45	363.99	152.78	249.77	385.53	953.87
93	22/02/2012	244.65	50.06	923.98	351.73	166.58	248.92	442.65	944.55
94	23/02/2012	910.98	222.41	937.74	351.02	250.91	249.26	952.69	952.77
95	24/02/2012	905.00	229.48	927.88	351.55	251.86	250.45	948.47	949.66
96	25/02/2012	907.85	231.53	933.83	354.29	253.19	251.59	895.04	947.61
97	26/02/2012	900.93	224.99	929.46	363.67	250.53	249.10	931.35	949.52
98	27/02/2012	893.77	229.98	905.62	320.96	250.36	249.04	932.11	926.01
99	28/02/2012	902.92	218.56	928.60	348.14	250.83	249.07	936.87	947.17
100	29/02/2012	901.92	224.55	932.03	363.78	250.10	248.48	946.99	951.52
101	01/03/2012	899.68	222.50	928.86	378.44	252.30	250.41	944.73	952.53
102	02/03/2012	908.46	218.72	933.26	340.25	252.41	255.01	942.84	939.86
103	03/03/2012	910.56	213.29	930.40	322.96	248.38	247.21	935.98	925.56
104	04/03/2012	903.66	225.23	929.51	365.99	253.93	252.27	944.21	948.29
105	05/03/2012	891.98	216.84	921.61	428.83	250.51	248.79	948.50	940.30
106	06/03/2012	893.04	216.22	921.56	349.71	252.92	250.65	935.29	943.28
107	07/03/2012	889.61	226.62	919.66	361.58	251.74	249.87	932.42	947.26
108	08/03/2012	810.37	214.89	873.79	347.78	239.84	238.41	896.53	906.64
109	09/03/2012	900.98	223.85	930.51	358.24	254.70	253.33	930.43	939.09
110	10/03/2012	911.14	221.79	938.62	359.51	253.43	251.81	943.87	942.39

111	11/03/2012	908.12	223.30	937.57	365.56	250.42	249.35	946.34	947.58
112	12/03/2012	914.19	227.86	941.16	361.05	255.36	254.39	948.76	953.41
113	13/03/2012	908.29	212.21	933.42	337.35	249.83	248.09	939.62	927.04
114	14/03/2012	896.63	218.29	929.96	365.43	252.69	251.28	932.98	946.91
115	15/03/2012	892.88	220.29	923.67	360.99	251.51	250.03	944.63	940.35
116	16/03/2012	867.43	204.12	931.17	366.52	250.33	248.61	928.59	940.02
117	17/03/2012	127.07	0.00	911.49	365.34	204.34	247.96	366.76	949.67
118	18/03/2012	11.40	0.00	940.34	365.25	126.29	251.33	245.70	945.12
119	19/03/2012	38.96	0.00	930.36	366.27	142.41	251.41	222.82	944.88
120	20/03/2012	796.62	184.11	929.06	344.59	235.68	247.97	843.83	927.40
121	21/03/2012	894.24	224.90	925.02	361.73	250.76	249.40	938.15	938.93
122	22/03/2012	903.39	228.60	927.88	356.88	250.92	250.24	942.94	937.80
123	23/03/2012	892.60	229.14	919.04	362.94	251.17	249.82	944.74	944.56
124	24/03/2012	900.21	227.55	928.41	365.62	251.15	250.01	938.91	948.63
125	25/03/2012	895.90	223.80	923.96	363.47	251.32	252.25	935.93	943.54
126	26/03/2012	895.89	214.03	923.41	341.55	247.07	247.28	932.11	932.16
127	27/03/2012	902.78	214.44	927.56	342.26	247.10	247.95	939.27	930.17
128	28/03/2012	890.54	200.96	932.04	356.47	251.44	249.45	915.45	936.31
129	29/03/2012	905.23	220.46	933.21	357.25	250.06	248.90	937.83	947.34
130	30/03/2012	903.06	223.21	932.14	363.32	251.92	250.64	932.71	943.61
131	31/03/2012	901.98	216.80	932.76	362.67	250.32	248.98	935.62	944.52
132	01/04/2012	898.87	211.65	926.47	353.29	248.61	247.00	940.77	939.91
133	02/04/2012	895.29	221.48	928.44	357.05	251.59	250.34	943.50	948.47
134	03/04/2012	900.98	207.17	923.71	332.02	251.27	250.32	939.21	934.45
135	04/04/2012	899.03	210.19	930.76	352.78	252.22	250.83	930.76	942.44
136	05/04/2012	865.69	179.35	918.09	311.64	249.94	246.49	899.94	923.98
137	06/04/2012	892.24	206.31	919.99	349.84	251.06	249.71	935.71	945.09
138	07/04/2012	895.92	203.04	925.16	354.26	254.38	253.27	934.48	942.43
139	08/04/2012	897.02	207.96	930.52	358.38	254.40	253.28	936.44	941.03

140	09/04/2012	861.78	197.96	921.18	366.37	251.07	249.82	903.81	950.96
141	10/04/2012	896.58	207.64	927.27	351.57	248.75	247.40	936.39	936.55
142	11/04/2012	883.21	209.34	923.11	382.02	249.98	248.66	931.94	955.48
143	12/04/2012	883.77	205.38	925.33	380.73	249.52	248.24	944.23	951.66
144	13/04/2012	861.37	209.99	898.56	362.65	250.63	249.03	934.45	935.03
145	14/04/2012	876.09	205.89	914.55	370.29	251.80	250.38	934.89	948.36
146	15/04/2012	885.05	207.31	925.21	365.94	251.44	250.05	937.37	938.67
147	16/04/2012	890.05	209.20	928.63	364.85	251.78	250.26	936.93	946.37
148	17/04/2012	894.36	204.52	929.47	362.91	251.27	249.91	935.02	934.90
149	18/04/2012	881.78	183.74	900.49	322.63	245.18	242.48	936.88	917.75
150	19/04/2012	721.14	148.36	917.81	336.38	247.05	242.50	810.95	919.36
151	20/04/2012	885.78	209.55	918.60	359.82	248.11	246.51	930.43	944.83
152	21/04/2012	885.76	204.92	916.26	359.60	248.30	247.15	930.28	946.66
153	22/04/2012	893.71	210.76	923.55	350.81	250.04	248.64	949.05	949.70
154	23/04/2012	896.81	203.76	929.87	360.37	251.09	249.54	931.02	954.23
155	24/04/2012	902.02	206.55	930.78	347.80	249.19	247.99	936.20	945.84
156	25/04/2012	889.22	208.82	920.59	356.08	251.25	249.83	942.26	948.32
157	26/04/2012	895.19	207.13	922.53	346.87	250.17	249.00	931.77	948.68
158	27/04/2012	884.19	206.34	916.10	355.21	251.14	249.77	939.26	947.16
159	28/04/2012	879.28	205.24	912.38	352.20	250.76	249.36	941.22	948.68
160	29/04/2012	888.80	205.40	919.66	354.96	251.15	249.96	939.65	944.65
161	30/04/2012	883.49	199.21	908.27	330.40	250.04	249.18	937.22	927.94
162	01/05/2012	885.03	199.76	911.17	335.01	249.60	248.43	917.63	936.05
163	02/05/2012	878.35	200.28	906.97	337.30	251.64	250.41	925.36	938.93
164	03/05/2012	873.96	188.21	903.66	319.17	247.45	246.01	916.14	923.88
165	04/05/2012	894.25	208.16	921.12	342.86	250.23	249.08	927.13	941.57
166	05/05/2012	893.78	194.12	917.85	320.60	243.65	243.03	928.92	925.37
Promedio		846.63	200.12	915.06	344.47	244.96	248.61	906.03	940.49
DESVEST.		182.989595	49.0994813	52.9947648	31.7583122	21.9585945	6.84545583	144.736253	44.2527197

Tabla B.2 Parámetros de bagazo y parámetros del aire.

PARAMETROS DEL BAGAZO					PARAMETROS DEL AIRE			
Día zafra	Vapor Generado t/día 11-12	Relacion Vapor Bagazo 11-12	Humedad Bagazo % 11-12	Poder calorifico (Gj/t)	Masa de bagazo ton/día 11-12	Temperatura media del aire F	Humedad relativa media	humedad Absoluta
inicio	3538							
1	3215	1.83	49.85%	9.06	1,761	80.24	63	0.0135
2	5035	1.87	51.18%	9.06	2,693	79.34	69	0.015
3	5855	1.72	50.73%	8.18	3,406	81.68	62	0.0165
4	5917	1.74	50.75%	8.18	3,396	82.4	61	0.0145
5	4460	1.84	51.67%	8.18	2,423	78.98	72	0.0155
6	4954	1.79	51.46%	8.18	2,772	80.24	67	0.0152
7	6072	1.70	53.64%	8.18	3,566	81.68	61	0.0144
8	5721	1.83	51.98%	7.59	3,129	83.48	49	0.0126
9	5734	1.87	50.74%	7.59	3,068	81.5	52	0.0128
10	5891	1.87	51.63%	7.59	3,154	79.88	55	0.0125
11	6062	1.85	51.74%	8.27	3,269	79.34	66	0.014
12	5399	1.84	51.30%	7.23	2,934	82.04	58	0.0136
13	6142	1.85	51.61%	7.23	3,320	80.78	65	0.0143
14	6175	1.91	51.78%	7.23	3,238	78.08	74	0.0151
15	6021	1.87	50.81%	8.61	3,218	79.16	71	0.0158
16	6078	1.82	51.97%	8.61	3,335	79.16	75	0.0168
17	6135	1.81	51.13%	8.61	3,386	80.24	76	0.0169
18	5722	1.77	50.67%	8.61	3,241	79.16	75	0.0168
19	6197	1.72	51.05%	7.23	3,599	79.52	68	0.0139
20	6224	1.86	50.32%	7.23	3,574	78.26	64	0.0135
21	6246	1.75	52.07%	7.23	3,567	77.9	69	0.0138
22	2033	1.44	51.77%	6.64	1,408	79.52	72	0.0151

23	4516	1.57	51.56%	6.64	2,869	81.14	74	0.017
24	6073	1.80	51.05%	6.64	3,380	78.44	73	0.0158
25	6191	1.82	52.36%	6.64	3,393	79.52	72	0.0115
26	6192	1.80	52.44%	8.92	3,437	83.84	58	0.0136
27	6033	1.83	51.01%	8.92	3,300	82.04	59	0.014
28	6156	1.81	50.53%	8.92	3,392	81.32	59	0.0139
29	6024	1.84	51.64%	8.95	3,281	80.42	65	0.0144
30	6213	1.83	50.31%	8.95	3,402	83.84	57	0.0135
31	6185	1.85	51.44%	8.95	3,343	82.76	60	0.0141
32	6070	1.80	51.40%	9.26	3,370	81.32	61	0.014
33	6017	1.82	51.08%	9.26	3,312	82.76	57	0.0138
34	5821	1.78	51.93%	9.26	3,269	84.56	47	0.0115
35	3738	1.61	51.64%	8.66	2,328	79.34	72	0.0159
36	3769	1.53	52.70%	8.66	2,459	77.36	75	0.0151
37	4157	1.59	51.34%	8.66	2,615	79.7	70	0.0152
38	6109	1.81	52.41%	8.66	3,371	78.62	76	0.0161
39	5960	1.83	52.56%	8.66	3,251	80.42	57	0.0126
40	6120	1.82	52.49%	8.44	3,365	80.24	60	0.0141
41	6176	1.81	52.32%	8.44	3,403	80.6	62	0.0142
42	6197	1.80	51.34%	8.44	3,434	79.34	75	0.0165
43	6221	1.80	52.00%	8.44	3,461	78.44	76	0.0165
44	6253	1.83	52.00%	9.08	3,417	81.32	76	0.0173
45	6160	1.82	52.82%	9.08	3,383	82.22	71	0.0171
46	6188	1.86	51.55%	8.98	3,325	81.68	68	0.0151
47	6215	1.84	51.59%	8.98	3,383	84.2	56	0.0138
48	6216	1.87	51.55%	8.98	3,320	83.12	59	0.0139
49	6187	1.83	52.09%	8.98	3,376	82.22	65	0.0152
50	5856	1.89	51.95%	8.92	3,097	81.5	74	0.0171
51	6192	1.82	52.08%	8.92	3,393	85.28	56	0.014
52	5741	1.74	51.69%	8.92	3,295	83.84	55	0.0138

53	6010	1.76	51.88%	8.92	3,415	81.68	65	0.0148
54	6140	1.84	51.45%	8.73	3,339	80.24	73	0.0165
55	6192	1.86	50.82%	8.73	3,326	80.78	78	0.0167
56	6151	1.84	50.80%	8.73	3,343	77.72	87	0.0175
57	6021	1.72	49.99%	9.71	3,493	79.16	75	0.0161
58	3357	1.68	50.68%	9.71	1,995	79.52	74	0.0162
59	5328	1.91	51.04%	9.71	2,783	79.34	77	0.0167
60	6181	1.99	49.44%	9.71	3,105	80.78	74	0.0166
61	6212	1.99	51.29%	8.97	3,120	81.32	73	0.0166
62	6239	2.01	51.69%	8.97	1,862	82.22	72	0.0166
63	6234	2.00	52.09%	8.86	3,113	81.32	74	0.0166
64	5957	2.02	50.60%	8.86	2,951	80.6	78	0.017
65	6298	2.06	50.58%	8.86	3,051	84.02	63	0.0182
66	6060	1.99	51.05%	8.86	3,051	85.46	53	0.0138
67	6311	1.98	51.32%	8.86	3,187	83.66	62	0.0152
68	6316	1.99	51.40%	8.35	3,169	81.86	68	0.0151
69	6331	2.04	51.11%	8.35	3,096	81.32	68	0.0138
70	6340	2.02	50.84%	8.18	3,140	81.14	73	0.0165
71	5468	2.01	49.88%	8.18	2,711	81.86	76	0.0168
72	6032	2.02	51.00%	8.18	2,991	80.96	76	0.0167
73	6334	1.97	50.78%	8.18	3,217	80.6	75	0.0166
74	6263	2.00	51.63%	8.18	3,130	82.58	69	0.0169
75	6272	2.01	51.05%	8.66	3,114	84.2	52	0.013
76	6202	2.00	51.17%	8.66	3,107	84.2	64	0.0158
77	5603	1.97	50.33%	8.66	2,838	84.38	52	0.013
78	5956	1.93	51.39%	8.47	3,088	83.3	58	0.0137
79	6361	1.90	51.50%	8.47	3,341	80.78	66	0.0151
80	6274	1.93	50.95%	8.47	3,253	80.06	72	0.0164
81	6264	1.94	49.75%	8.44	3,228	81.5	70	0.0163
82	6324	1.95	51.47%	8.44	3,237	82.04	71	0.0165

83	5895	1.96	50.71%	8.44	3,012	84.2	63	0.0182
84	6314	1.97	49.89%	8.44	3,211	85.46	57	0.014
85	6330	2.00	50.54%	9.32	3,162	83.48	64	0.0155
86	4884	1.78	51.20%	9.32	2,744	84.56	70	0.018
87	6446	1.94	50.12%	9.32	3,315	84.92	53	0.0136
88	6437	1.93	50.01%	9.32	3,332	81.5	64	0.0142
89	6382	1.93	50.92%	8.92	3,310	81.86	69	0.0158
90	6419	1.92	50.71%	8.92	3,339	84.02	64	0.016
91	5886	1.94	50.76%	8.49	3,026	88.16	45	0.0128
92	4733	1.98	50.28%	8.49	2,392	87.44	49	0.0138
93	4995	1.96	50.21%	9.2	2,554	84.92	60	0.0149
94	6315	1.93	50.48%	9.2	3,273	84.56	64	0.016
95	6366	1.95	51.08%	9.2	3,260	83.12	65	0.0158
96	6342	1.98	49.48%	9.2	3,196	83.48	67	0.016
97	6394	2.01	50.67%	9.2	3,186	82.76	69	0.016
98	5828	2.02	50.02%	9.2	2,888	83.3	71	0.018
99	6197	2.00	50.46%	9.1	3,102	83.3	68	0.016
100	6375	1.99	48.87%	9.1	3,197	83.3	65	0.0158
101	6401	1.96	51.60%	9.1	3,261	82.58	70	0.017
102	6184	1.99	48.60%	9.1	3,103	82.94	76	0.0181
103	5685	1.98	49.90%	9.1	2,870	83.12	73	0.018
104	6406	2.01	50.91%	8.64	3,188	82.76	76	0.0181
105	6242	1.92	48.26%	9.09	3,251	84.56	71	0.0181
106	6191	1.98	50.11%	9.09	3,124	84.56	70	0.018
107	6371	1.99	50.76%	9.09	3,202	84.56	72	0.0182
108	6361	1.99	49.75%	8.46	3,200	84.74	68	0.0171
109	6315	2.00	50.47%	8.46	3,152	84.02	70	0.018
110	6313	1.98	50.23%	8.46	3,193	84.74	70	0.018
111	6409	1.98	49.78%	8.46	3,240	82.22	77	0.0182
112	6278	1.99	50.78%	8.46	3,161	86.36	49	0.0135

113	6026	2.04	51.48%	8.27	2,949	86	55	0.0147
114	6362	2.09	50.81%	8.27	3,041	84.92	63	0.0159
115	6330	2.05	51.19%	8.27	3,089	85.82	68	0.017
116	6179	2.05	49.53%	9.18	3,009	84.92	66	0.016
117	4780	2.06	49.88%	9.18	2,322	83.66	70	0.0179
118	4782	2.08	48.95%	9.18	2,297	84.2	71	0.0178
119	4777	2.13	49.27%	9.1	2,247	84.38	72	0.018
120	5832	2.01	50.16%	9.1	2,908	85.28	64	0.0166
121	6338	2.02	50.53%	8.83	3,143	83.84	68	0.0166
122	6398	2.04	52.05%	8.83	3,142	83.48	70	0.0178
123	6422	1.98	51.29%	8.83	3,244	82.94	71	0.0178
124	6429	1.95	51.06%	8.83	3,292	83.48	65	0.0158
125	6366	1.94	51.60%	8.83	3,281	83.3	65	0.0158
126	6068	1.95	51.71%	8.83	3,117	85.46	67	0.0173
127	6065	2.02	49.31%	8.83	3,000	83.84	73	0.018
128	6081	2.00	51.39%	8.83	3,039	83.84	76	0.0186
129	6341	1.99	51.30%	9.12	3,187	83.12	78	0.019
130	6382	1.98	50.43%	9.12	3,223	84.02	76	0.0186
131	6240	1.98	50.46%	9.34	3,159	84.02	72	0.018
132	6185	1.99	50.74%	9.34	3,113	83.48	74	0.0182
133	6605	1.99	51.68%	9.34	3,313	85.64	68	0.018
134	6301	1.94	51.10%	9.04	3,246	85.46	68	0.018
135	6814	1.98	51.45%	9.04	3,449	85.82	69	0.0182
136	6029	1.95	51.55%	7.77	3,085	86.9	72	0.0193
137	6860	2.00	51.94%	7.77	3,428	86	77	0.0196
138	6829	1.95	52.20%	7.77	3,511	81.32	86	0.0197
139	6991	2.21	51.65%	7.77	3,169	84.74	82	0.0215
140	6262	1.96	52.65%	7.77	3,199	84.92	80	0.0213
141	6083	1.92	49.59%	9.54	3,163	85.64	72	0.0191
142	6414	1.91	52.25%	9.54	3,358	85.28	68	0.0177

143	6370	1.90	51.65%	9.54	3,356	83.12	78	0.0217
144	6208	1.82	52.63%	8.76	3,403	82.58	78	0.0215
145	6361	1.87	53.31%	8.76	3,395	82.4	73	0.0213
146	6254	1.90	53.47%	8.76	3,290	84.2	73	0.0183
147	6246	1.92	51.79%	9.09	3,254	82.94	75	0.0179
148	6165	2.22	51.26%	9.09	2,776	79.88	86	0.0185
149	5451	1.98	52.13%	9.29	2,760	77.9	89	0.0184
150	5287	2.25	49.01%	9.29	2,346	77.9	84	0.018
151	6209	2.04	52.17%	9.29	3,040	81.14	84	0.0198
152	6160	2.04	51.99%	9.29	3,014	79.34	84	0.0178
153	6109	2.04	51.94%	9.29	3,001	78.62	88	0.0185
154	6151	2.03	51.15%	7.84	3,037	82.04	77	0.0182
155	6020	2.07	50.62%	7.84	2,903	81.32	77	0.018
156	6110	2.10	50.28%	8.61	2,915	75.02	96	0.0183
157	6008	2.06	50.32%	8.61	2,914	76.1	94	0.0183
158	6107	2.08	51.53%	8.61	2,936	80.6	85	0.0215
159	6090	2.06	51.24%	8.61	2,952	80.42	86	0.0216
160	6117	2.10	51.04%	8.61	2,912	80.96	84	0.0214
161	5873	2.02	51.22%	8.61	2,912	78.8	90	0.0191
162	5886	1.86	51.50%	7.7	3,164	80.78	83	0.0213
163	6286	1.81	51.87%	7.7	3,471	79.7	87	0.0188
164	5498	1.88	51.66%	7.7	2,928	79.34	87	0.0188
165	6077	1.97	50.70%	7.68	3,087	80.96	87	0.019
166	5595	1.97	52.09%	7.68	2,839	81.5	79	0.018
DESVEST	664.27625	0.1222892	0.0092609	0.6366872	342.102644	2.3989161	9.585449	0.0022029
PROMEDIO	5971	2	51%	8.6348795	3105.07866	82.152771	69.73494	0.0164608

Tabla B.3 Informes técnicos de medición de eficiencia Caldera #6 (analizador de gases)

Fecha	Hora Medicion	Dia Zafra	Eficiencia C6	O2	CO en ppm	CO2	Temp salida de gases C6	Exceso Aire	GeneracionKlb/h	Velocidad Inducido Hz
19/02/2012	01:11 p.m.	90	75.60%	4.00%	4000	16.60%	338	23.00%	242	59
20/02/2012	9:51 a.m	91	72.60%	4.30%	3812	16.30%	387	25.00%	226	59
21/02/2012		92			Caldera fuera de línea					
22/02/2012		93								
23/02/2012	8:22 a.m	94	71.70%	4.30%	3204	16.30%	420	25.00%	228	59
24/02/2012	8:03 a.m	95	72.70%	3.50%	4000	17.10%	420	20.00%	237	59.86
25/02/2012	9:36 a.m	96	72.10%	4.10%	4000	16.50%	436	24.00%	228	59.92
26/02/2012	8:47 a.m	97	73.10%	4.00%	4000	16.60%	402	23.00%	231	59.9
27/02/2012	9:49 a.m	98	73.80%	3.00%	4000	17.50%	395	17.00%	233	56.17
28/02/2012	08:09 a.m.	99	73.60%	3.70%	4000	16.90%	396	21.00%	235	57.33
29/02/2012	08:54 a.m.	100	73.80%	3.30%	4000	17.30%	394	19.00%	232	56
01/03/2012	8:48 a.m	101	73.30%	3.40%	4000	17.10%	406	19.00%	226	57.82
02/03/2012	10:04 a.m	102	73.30%	3.20%	4000	17.30%	411	18.00%	222	58.29
03/03/2012	10:25 a.m.	103	74.20%	4.40%	1056	16.20%	368	26.00%	170	47
04/03/2012	10:29 a.m	104	73.70%	3.00%	4000	17.60%	411	16.00%	213	55
05/03/2012	10:48 a.m	105	73.50%	2.90%	4000	17.60%	409	17.60%	237	55.02
06/03/2012	10:30 a.m	106	73.40%	3.60%	4000	16.90%	404	21.00%	220	53
07/03/2012	12:45 p.m	107	73.60%	3.30%	4000	17.30%	404	18.00%	211	53
08/03/2012	10:21 a.m	108	73.40%	3.30%	4000	17.30%	406	19.00%	219	53
09/03/2012	10:23 a.m	109	73.50%	3.20%	4000	17.40%	409	18.00%	229	52.9
10/03/2012	10:10 a.m	110	73.40%	2.90%	4000	17.60%	417	16.00%	232	54.05
11/03/2012	09:58 a.m	111	73.80%	3.00%	4000	17.50%	408	17.00%	217	54
12/03/2012	09:57 a.m	112	73.40%	3.10%	4000	17.40%	408	17.00%	230	54.32
13/03/2012	09:23 a.m	113	73.40%	2.90%	4000	17.70%	409	16.00%	231	54.77
14/03/2012	11:05 a.m	114	74.20%	3.00%	4000	17.50%	407	17.00%	229	55

15/03/2012	09:23 a.m	115	73.40%	3.60%	4000	17.00%	407	20.00%	224	55.25
16/03/2012	11:55 a.m	116	73.80%	3.10%	4000	15.50%	416	17.00%	229	55.72
21/03/2012	1:36 p.m	120	72.30%	3.30%	4000	17.30%	455	19.00%	244	59
22/03/2012	12:05 p.m	122	72.60%	2.50%	4000	18.00%	443	14.00%	230	57.12
23/03/2012	1:32 p.m	123	72.80%	2.80%	4000	17.80%	447	15.00%	235	58.4
24/03/2012	10:57 a.m	124	72.30%	3.10%	4000	17.40%	451	17.00%	216	59.92
25/03/2012	11:08 a.m	125	72.80%	2.80%	4000	17.70%	450	15.00%	226	59.47
26/03/2012	05:32 p.m	126	72.40%	3.10%	4000	17.50%	443	17.00%	220	58.99
27/03/2012	11:05 a.m	127	72.50%	2.09%	4000	16.90%	451	16.02%	225	58.00
28/03/2012	5:18 p.m	128	72.80%	2.80%	4000	17.80%	443	15.00%	226	55.95
29/03/2012	3:29 p.m	129	72.90%	2.20%	4000	18.40%	441	11.00%	225	55.1
30/03/2012	12:12 p.m	130	72.80%	3.40%	4000	17.90%	445	18.00%	237	55.86
31/03/2012	10:45 a.m	131	72.60%	6.09%	4000	16.90%	454	16.02%	231	55.01
01/04/2012	10:47 a.m	132	72.90%	2.40%	4000	18.20%	434	13.00%	226	55.00
02/04/2012	11:12 a.m	133	72.60%	2.90%	4000	18.90%	431	15.80%	230	55.2
03/04/2012	1:32 p.m	134	72.80%	2.80%	4000	17.80%	447	15.00%	235	55.4
04/04/2012	10:57 a.m	135	72.30%	3.10%	4000	17.40%	451	17.00%	216	55.92
05/04/2012	11:08 a.m	136	72.80%	2.80%	4000	17.70%	450	15.00%	226	55.47
07/04/2012	05:32 p.m	138	72.50%	3.10%	4000	17.50%	441	17.00%	220	55.99
09/04/2012	11:05 a.m	140	72.50%	2.10%	4000	18.90%	451	16.02%	225	55.00
10/04/2012	5:18 p.m	141	72.80%	2.80%	4000	17.80%	443	17.00%	226	55.95
11/04/2012	11:02 a.m	142	72.80%	2.40%	4000	15.20%	434	14.00%	230	55.00
12/04/2012	09:57 a.m	143	72.60%	3.80%	4000	17.80%	443	17.00%	228	55.95
13/04/2012	10:20 a.m	144	72.80%	2.65%	4000	15.20%	440	18.00%	226	55.00
14/04/2012	03:09 p.m	145	73.10%	2.40%	4000	18.10%	431	13.00%	222	55.00
15/04/2012	09:54 a.m	146	73.10%	2.40%	4000	18.10%	431	13.00%	228	55.00
16/04/2012	8:10 a.m	147	72.90%	2.60%	4000	18.00%	431	14.00%	225	55.00
17/04/2012	8:53 a.m	148	73.10%	2.50%	4000	18.10%	433	13.00%	221	55.00
18/04/2012	10:14 a.m	149	73.20%	3.40%	4000	17.20%	421	19.00%	235	55.00
19/04/2012						Fuera de línea				
20/04/2012	9:55 a.m	151	72.70%	4.10%	2888	16.40%	423	24.00%	228	55.00
21/04/2012	10:55 a.m	152	72.90%	2.60%	4000	18.00%	431	14.00%	225	55.00
23/04/2012	10:35 a.m	154	72.80%	2.90%	4000	17.00%	456	16.00%	227	55.00

24/04/2012	11:10 a.m	155	72.90%	3.20%	4000	18.00%	438	19.00%	228	55.00
25/04/2012	4:52 p.m	156	73.10%	3.32%	4000	17.40%	429	18.00%	208	55.00
26/04/2012	3:40 p.m	157	73.20%	3.60%	4000	16.20%	411	20.00%	230	55.00
27/04/2012	5:44 p.m	158	73.40%	3.10%	4000	17.20%	417	19.00%	236	55.00
28/04/2012	9:55 a.m	159	73.30%	3.40%	4000	18.90%	451	17.00%	229	55.00
30/04/2012	10:01 a.m	161	73.20%	3.10%	4000	19.80%	440	18.10%	230	55.00
01/05/2012	11:50 a.m	162	73.20%	3.00%	2313	17.50%	407	16.00%	212	55.00
03/05/2012	11:32 a.m	163	73.70%	2.20%	4000	18.30%	424	12.00%	216	55.02
04/05/2012	05:04 p.m	164	73.40%	2.20%	4000	18.40%	433	11.00%	233	55.00
05/05/2012	9:47 a.m	165	73.10%	3.30%	4000	17.30%	424	18.00%	204	55.00
06/05/2012	9:10 a.m	166	73.40%	3.10%	4000	19.80%	417	18.10%	233	55.00
07/05/2012	9:15 a.m	167	73.40%	2.50%	4000	18.10%	431	13.00%	227	55.00
08/05/2012	10:26 a.m	169	73.60%	3.50%	4000	17.10%	467	20.00%	205	55.00
09/05/2012	09:15 a.m	170	73.50%	3.30%	4000	18.00%	438	19.00%	220	55.00
10/05/2012	09:05 a.m	171	73.50%	3.60%	4000	18.00%	411	18.00%	225	55.00
11/05/2012	09:39 a.m	172	73.10%	3.10%	4000	18.30%	434	18.00%	210	55.00
12/05/2012	09:02 a.m	173	73.40%	3.20%	4000	18.80%	419	18.30%	221	55.00
14/05/2012	3:40 p.m	174	73.40%	2.80%	4000	17.70%	425	15.00%	215	55.00

Tabla B.4 Informes técnicos de medición de eficiencia Caldera #7 (analizador de gases)

Fecha	Hora Medicion	Dia Zafra	Eficiencia C7	O2	CO en ppm	CO2	Temp salida de gases C7	Exceso Aire	GeneracionKlb/h	Velocidad Inducido Hz
19/02/2012	10:04 a.m	90	76.00%	4.10%	438	16.50%	310	24.00%	352	53
20/02/2012	10:04 a.m	91	76.10%	3.60%	877	16.90%	313	21.00%	365	53
21/02/2012		92								
22/02/2012		93								
23/02/2012	8:34 a.m	94	76.10%	4.00%	336	16.50%	313	24.00%	368	55
24/02/2012	8:15 a.m	95	76.10%	4.40%	253	16.20%	305	26.00%	342	53
25/02/2012	10:02 a.m	96	76.10%	3.50%	881	17.10%	313	19.00%	369	53
26/02/2012	9:08 a.m	97	76.30%	4.00%	971	16.60%	301	23.00%	367	52
27/02/2012	10:05 a.m	98	76.10%	3.70%	805	16.90%	312	21.00%	356	53
28/02/2012	7:57 a.m	99	75.90%	3.80%	654	16.80%	309	21.00%	370	54.3
29/02/2012	9:08 a.m	100	76.10%	3.70%	800	16.90%	313	21.00%	364	53
01/03/2012	9:02 a.m	101	76.00%	4.30%	534	16.30%	312	26.00%	364	53.5
02/03/2012	10:51 a.m	102	76.30%	3.80%	910	16.70%	308	22.00%	375	55.5
03/03/2012	09:59a.m	103	76.60%	7.00%	34	13.60%	273	50.00%	206	41.5
04/03/2012	10:12 a.m	104	76.00%	3.50%	1214	17.10%	317	20.00%	368	55
05/03/2012	11:01 a.m	105	76.20%	3.70%	945	16.90%	313	21.00%	363	52.8
06/03/2012	10:40 a.m	106	76.20%	3.50%	1074	17.00%	308	20.00%	360	52
07/03/2012	1:01 p.m	107	76.30%	3.30%	844	17.30%	310	18.00%	377	50
08/03/2012	10:41 a.m	108	76.50%	4.30%	122	16.30%	305	26.00%	370	53
09/03/2012	10:42 a.m	109	76.60%	3.90%	156	16.70%	305	22.00%	363	53
10/03/2012	10:21 a.m	110	76.40%	3.50%	1063	17.10%	304	19.00%	343	52.4
11/03/2012	10:14 a.m	111	76.40%	3.40%	989	17.10%	304	19.00%	361	52
12/03/2012	10:13 a.m	112	76.10%	3.80%	974	16.70%	310	22.00%	362	51.2

13/03/2012	09:51a.m	113	76.30%	3.70%	733	16.80%	312	21.00%	370	53.5
14/03/2012	10:39 a.m	114	76.00%	3.70%	699	16.90%	315	21.00%	369	53.2
15/03/2012	09:04 a.m	115	76.30%	3.60%	771	17.00%	308	20.00%	367	52.4
16/03/2012	11:31 a.m	116	76.10%	3.10%	1696	17.50%	313	17.00%	374	54.6
21/03/2012	1:59 p.m	120	76.70%	3.50%	497	17.00%	309	20.00%	353	50
22/03/2012	12:24 p.m	122	76.80%	3.30%	303	17.30%	305	19.00%	358	49
23/03/2012	1:05 p.m	123	76.60%	3.40%	480	17.40%	310	20.10%	363	54
24/03/2012	11:17 a.m	124	76.80%	3.10%	598	17.50%	310	17.00%	339	55
25/03/2012	11:27 a.m	125	76.70%	3.20%	968	17.40%	314	18.00%	355	52
26/03/2012	05:49 p.m	126	76.10%	3.20%	1571	17.30%	309	18.00%	382	52.4
27/03/2012	12:20 p.m	127	76.60%	3.10%	1696	17.40%	314	17.00%	373	54.6
28/03/2012	5:33 p.m	128	76.40%	3.40%	1079	17.10%	309	19.00%	358	53.1
29/03/2012	4:34 p.m	129	76.40%	3.30%	1131	17.30%	310	18.00%	370	53
30/03/2012	12:30 p.m	130	76.70%	3.40%	497	17.00%	309	20.00%	353	50
31/03/2012	11:14 a.m	131	76.80%	3.40%	4000	17.20%	310	19.00%	368	54
01/04/2012	10:40 a.m	132	76.80%	3.30%	491	17.45%	309	18.45%	360	55
02/04/2012	09:50a.m	133	76.30%	3.70%	733	17.80%	312	18.00%	370	53.5
03/04/2012	10:39 a.m	134	76.00%	3.70%	699	16.90%	315	21.00%	369	53.2
04/04/2012	09:04 a.m	135	76.30%	3.60%	771	17.00%	308	20.00%	367	52.4
05/04/2012	11:31 a.m	136	76.10%	3.10%	1696	17.50%	313	17.00%	374	54.6
07/04/2012	1:59 p.m	138	76.70%	3.50%	497	17.00%	309	20.00%	353	50
09/04/2012	12:24 p.m	140	76.80%	3.30%	303	17.30%	305	19.00%	358	49
10/04/2012	1:05 p.m	141	76.60%	3.40%	480	17.40%	310	20.10%	363	54
11/04/2012	10:42 a.m	142	76.70%	3.90%	156	16.70%	305	22.00%	363	53
12/04/2012	10:20 a.m	143	76.60%	3.10%	1696	17.50%	313	17.00%	374	54.6
13/04/2012	10:55 a.m	144	76.70%	3.50%	497	17.00%	309	20.00%	353	50
14/04/2012	03:32 p.m	145	76.70%	3.40%	4000	18.10%	311	13.00%	368	53
15/04/2012	10:15 a.m	146	76.40%	2.60%	1756	17.90%	311	14.00%	376	53
16/04/2012	8:40 a.m	147	76.30%	3.30%	945	17.80%	314	18.00%	375	54

17/04/2012	9:17 a.m	148	76.40%	3.50%	883	17.10%	312	20.00%	371	52
18/04/2012	9:56 a.m	149	76.50%	3.20%	1407	17.30%	299	18.00%	360	51
19/04/2012	10:21 a.m	150	76.80%	3.70%	980	17.90%	318	16.00%	375	54
20/04/2012	10:16 a.m	151	76.40%	2.50%	1403	18.00%	312	13.00%	367	49
21/04/2012	11:05 a.m	152	76.80%	3.40%	4000	17.10%	310	18.00%	368	54
23/04/2012	10:45 a.m	154	76.80%	3.50%	946	17.47%	345	17.45%	356	55
24/04/2012	10:45 a.m	155	76.50%	3.20%	1407	18.10%	311	14.00%	340	55
25/04/2012	04:28 p.m	156	76.60%	2.50%	2198	18.00%	398	18.00%	350	53.4
26/04/2012	3:06 p.m	157	76.30%	3.80%	1696	16.90%	311	21.00%	356	51.3
27/04/2012	5:28 p.m	158	76.40%	3.70%	386	16.90%	311	21.00%	364	51.3
28/04/2012	10:16 a.m	159	76.40%	3.50%	945	19.00%	340	19.00%	354	51
30/04/2012	10:55 a.m	161	76.60%	3.20%	854	18.70%	310	18.70%	361	51.4
01/05/2012	11:21 a.m	162	76.50%	3.20%	1835	17.30%	293	18.00%	353	50.1
03/05/2012	11:09 a.m	163	76.40%	3.50%	517	17.00%	307	20.00%	370	51.3
04/05/2012	4:40p.m	164	76.30%	4.00%	448	16.60%	308	23.00%	375	52
05/05/2012	9:19 a.m	165	76.30%	3.90%	460	16.70%	308	22.00%	347	51
06/05/2012	9:40 a.m	166	76.47%	3.20%	470	17.00%	314	19.00%	360	50
07/05/2012	8:49 a.m	167	76.30%	4.10%	383	16.40%	309	24.00%	348	54
08/05/2012	10:08 a.m	169	76.60%	5.90%	460	14.70%	384	21.00%	321	55.00
09/05/2012	09:41 a.m	170	76.50%	4.50%	378	16.00%	480	20.00%	355	55.00
10/05/2012	09:48 a.m	171	76.50%	3.90%	497	18.00%	345	21.00%	258	52.4
11/05/2012	9:19 a.m	172	76.30%	3.70%	470	18.70%	318	21.00%	360	51
12/05/2012	9:40 a.m	173	76.49%	3.50%	450	16.00%	324	19.00%	354	50
14/05/2012	03:27p.m	174	76.30%	2.90%	955	17.60%	311	16.00%	385	58

APENDICE C

Tablas de resultados obtenidos a partir del cálculo de eficiencia, cálculo de los calentadores, aire requerido para la combustión, cantidad de gases en la combustión y pesos individuales en kilogramos por kilogramo de bagazo.

Tabla C.1 Cálculo de eficiencia térmica para las calderas No.6 y No.7

zafra	Caldera No. 6						Caldera No. 7					
	Hagua(Btu/lbm)	Hvapor(Btu/lbm)	poder calofifico (btu/lbm)	Masa de bagazo lbm/dia	Flujo vapor salida C6(lbm/dia)	Eficiencia	Hagua(Btu/lbm)	Hvapor(Btu/lbm)	poder calofifico (btu/lbm)	Masa de bagazo lbm/dia	Flujo vapor salida C7(lbm/dia)	Eficiencia
1	189.93	1455.00	3833.58	1577416.96	3260400.00	0.68	190.74	1412.86	3833.58	2366125.44	5636160.00	0.76
2	203.90	1486.15	3833.58	2413062.40	4152240.00	0.58	200.72	1473.68	3833.58	3619593.60	5617200.00	0.60
3	212.10	1480.80	3461.22	3051962.99	4787520.00	0.57	210.23	1481.40	3461.22	4577944.49	5746080.00	0.46
4	211.90	1483.25	3461.22	3043102.72	5037840.00	0.61	213.27	1489.02	3461.22	4564654.08	8240880.00	0.67
5	198.83	1387.91	3461.22	2170685.44	3048720.00	0.48	199.94	1477.89	3461.22	3256028.16	4690080.00	0.53
6	202.16	1476.98	3461.22	2483712.00	4607520.00	0.68	207.75	1458.41	3461.22	3725568.00	5846880.00	0.57
7	206.14	1483.49	3461.22	3195136.00	5106480.00	0.59	204.55	1486.85	3461.22	4792704.00	5666400.00	0.44
8	207.07	1467.93	3211.58	2803584.00	5078980.00	0.71	205.55	1484.53	3211.58	4205376.00	5832960.00	0.55
9	219.64	1477.65	3211.58	2748928.00	5211750.00	0.74	218.48	1477.01	3211.58	4123392.00	6180720.00	0.59
10	222.72	1692.82	3211.58	2825984.00	5227620.00	0.85	222.82	1483.38	3211.58	4238976.00	6213600.00	0.58
11	223.74	1486.36	3499.31	2929024.00	5099390.00	0.63	221.83	1489.31	3499.31	4393536.00	6227280.00	0.51
12	220.20	1474.52	3059.25	2629141.76	4661820.00	0.73	217.54	1463.40	3059.25	3943712.64	6181920.00	0.64
13	226.45	1483.12	3059.25	2974720.00	5431100.00	0.75	224.36	1486.55	3059.25	4462080.00	6162240.00	0.57
14	223.38	1492.97	3059.25	2901400.32	5289310.00	0.76	223.32	1483.21	3059.25	4352100.48	6124080.00	0.58
15	224.10	1486.41	3643.17	2883139.84	5193010.00	0.62	221.21	1483.32	3643.17	4324709.76	5936160.00	0.48
16	222.75	1485.49	3643.17	2987747.84	5267180.00	0.61	225.30	1433.77	3643.17	4481621.76	8455440.00	0.63
17	224.39	1481.08	3643.17	3033856.00	5279190.00	0.61	222.77	1484.33	3643.17	4550784.00	6032880.00	0.46
18	220.86	1488.96	3643.17	2903936.00	4791710.00	0.57	222.55	1483.48	3643.17	4355904.00	6028800.00	0.48
19	223.65	1492.27	3059.25	3224704.00	5168690.00	0.66	222.26	1486.62	3059.25	4837056.00	5933520.00	0.51
20	225.43	1483.73	3059.25	3202304.00	5190000.00	0.67	221.54	1488.34	3059.25	4803456.00	6090960.00	0.53
21	226.10	1479.81	3059.25	3196336.64	5103080.00	0.65	224.02	1485.97	3059.25	4794504.96	6049920.00	0.52
22	193.92	1311.84	2809.60	1261140.68	1705300.00	0.54	160.07	1265.46	2809.60	1891711.02	2569680.00	0.53
23	216.77	1479.31	2809.60	2570315.78	5101260.00	0.89	186.44	1314.29	2809.60	3855473.66	6090720.00	0.63
24	214.75	1486.22	2809.60	3028043.95	5198650.00	0.78	213.18	1484.69	2809.60	4542065.92	5634720.00	0.56
25	214.73	1488.61	2809.60	3040385.20	5341890.00	0.80	213.46	1488.05	2809.60	4560577.81	6195120.00	0.62
26	222.96	1484.97	3774.34	3079641.60	5168090.00	0.56	221.63	1485.94	3774.34	4619462.40	5981040.00	0.43
27	221.08	1481.29	3774.34	2956610.26	4978700.00	0.56	223.62	1488.06	3774.34	4434915.39	5881680.00	0.44
28	222.03	1478.07	3774.34	3038850.02	5260190.00	0.58	220.26	1486.04	3774.34	4558275.03	6101760.00	0.45

29	219.05	1489.24	3787.04	2939539.06	5304800.00	0.61	217.21	1482.67	3787.04	4409308.59	6146880.00	0.47
30	222.21	1486.62	3787.04	3048209.92	5229990.00	0.57	219.44	1487.39	3787.04	4572314.88	5892000.00	0.43
31	224.78	1490.27	3787.04	2994897.92	5302810.00	0.59	222.61	1482.98	3787.04	4492346.88	5945040.00	0.44
32	221.44	1485.06	3918.21	3019539.50	5189070.00	0.55	219.32	1484.89	3918.21	4529309.25	5855520.00	0.42
33	220.32	1489.12	3918.21	2967365.42	4934970.00	0.54	217.68	1484.49	3918.21	4451048.13	5991840.00	0.44
34	220.81	1491.32	3918.21	2929024.00	4866400.00	0.54	219.25	1485.18	3918.21	4393536.00	5767680.00	0.42
35	218.23	1238.42	3664.33	2085708.80	224640.00	0.03	218.54	1484.53	3664.33	3128563.20	6020640.00	0.66
36	212.81	0.00	3664.33	2203102.72	0.00	0.00	217.64	1486.72	3664.33	3304654.08	6037680.00	0.63
37	156.88	1210.83	3664.33	2343452.16	797070.00	0.10	214.71	1486.43	3664.33	3515178.24	6116400.00	0.60
38	220.47	1483.54	3664.33	3020012.80	5082930.00	0.58	214.96	1482.83	3664.33	4530019.20	5839440.00	0.45
39	216.91	1480.76	3664.33	2912967.68	5022250.00	0.59	218.25	1485.17	3664.33	4369451.52	6084240.00	0.48
40	220.14	1485.76	3571.24	3014681.60	5226300.00	0.61	218.73	1482.28	3571.24	4522022.40	6118320.00	0.48
41	220.84	1486.98	3571.24	3049500.16	5290820.00	0.62	219.04	1488.25	3571.24	4574250.24	5890560.00	0.46
42	210.17	1461.93	3571.24	3076738.56	4992520.00	0.57	207.95	1464.50	3571.24	4615107.84	6065760.00	0.46
43	222.12	1485.21	3571.24	3100760.32	5233980.00	0.60	219.99	1489.19	3571.24	4651140.48	6088800.00	0.47
44	222.36	1494.48	3842.04	3062071.04	5302860.00	0.57	220.58	1487.43	3842.04	4593106.56	6133680.00	0.44
45	219.83	1490.66	3842.04	3031168.00	5198710.00	0.57	218.17	1484.36	3842.04	4546752.00	5650800.00	0.41
46	222.13	1484.31	3799.73	2978877.44	5211650.00	0.58	220.61	1486.90	3799.73	4468316.16	5799840.00	0.43
47	221.24	1491.47	3799.73	3031490.56	5208590.00	0.57	218.13	1486.52	3799.73	4547235.84	5941680.00	0.44
48	220.44	1490.77	3799.73	2974298.88	5208590.00	0.59	218.68	1490.57	3799.73	4461448.32	5925360.00	0.44
49	222.02	1489.46	3799.73	3024896.00	5160690.00	0.57	220.54	1487.69	3799.73	4537344.00	6178560.00	0.45
50	220.28	1485.59	3774.34	2774616.32	4907430.00	0.59	218.46	1484.15	3774.34	4161924.48	5953200.00	0.48
51	219.04	1487.60	3774.34	3040271.36	4932250.00	0.55	217.04	1489.09	3774.34	4560407.04	5883360.00	0.43
52	216.56	1480.90	3774.34	2952535.04	4361970.00	0.49	215.92	1479.09	3774.34	4428802.56	6083040.00	0.46
53	219.92	1485.46	3774.34	3059986.19	4899640.00	0.54	218.18	1484.62	3774.34	4589979.28	6039840.00	0.44
54	219.72	1484.94	3693.95	2992147.20	4885030.00	0.56	216.52	1485.59	3693.95	4488220.80	5916000.00	0.45
55	218.15	1485.29	3693.95	2980320.00	4723840.00	0.54	216.66	1491.07	3693.95	4470480.00	6044880.00	0.47
56	214.54	1485.86	3693.95	2995587.84	4723610.00	0.54	212.10	1490.62	3693.95	4493381.76	5807520.00	0.45
57	215.16	1486.09	4108.62	3129728.00	4534360.00	0.45	214.17	1489.56	4108.62	4694592.00	5934480.00	0.39
58	955.24	1202.12	4108.62	1787546.88	591310.00	0.02	216.70	1470.97	4108.62	2681320.32	5750880.00	0.65
59	186.93	1385.85	4108.62	2493863.68	3783580.00	0.44	215.91	1484.69	4108.62	3740795.52	6138000.00	0.51
60	217.41	1478.28	4108.62	2782097.92	5440900.00	0.60	215.67	1485.56	4108.62	4173146.88	5754480.00	0.43
61	218.62	1484.53	3795.50	2795717.12	5390910.00	0.64	217.11	1486.10	3795.50	4193575.68	5783520.00	0.46
62	219.08	1485.96	3795.50	2780404.48	5328360.00	0.64	217.36	1487.56	3795.50	4170606.72	5910960.00	0.47

63	219.90	1486.82	3748.96	2789647.36	5327250.00	0.65	217.99	1486.35	3748.96	4184471.04	6133920.00	0.50
64	219.84	1484.35	3748.96	2643997.44	5157940.00	0.66	221.92	1485.27	3748.96	3965996.16	8395680.00	0.71
65	222.05	1483.64	3748.96	2733516.80	5436720.00	0.67	221.60	1483.64	3748.96	4100275.20	6149760.00	0.50
66	219.36	1480.35	3748.96	2733993.60	5329470.00	0.66	217.51	1480.18	3748.96	4100990.40	6151440.00	0.51
67	221.92	1479.91	3748.96	2855695.36	5465420.00	0.64	220.62	1487.63	3748.96	4283543.04	6146400.00	0.48
68	218.26	1483.56	3533.16	2839558.40	5490700.00	0.69	216.84	1485.73	3533.16	4259337.60	5936160.00	0.50
69	221.13	1481.80	3533.16	2773863.68	5360310.00	0.69	219.88	1488.38	3533.16	4160795.52	5806320.00	0.50
70	222.31	1484.38	3461.22	2813164.39	5611770.00	0.73	220.22	1483.12	3461.22	4219746.59	6117840.00	0.53
71	217.94	1476.19	3461.22	2429028.85	4835460.00	0.72	216.93	1480.30	3461.22	3643543.27	6065280.00	0.61
72	221.18	1482.59	3461.22	2680030.87	5200100.00	0.71	219.99	1483.88	3461.22	4020046.31	5823120.00	0.53
73	220.50	1482.88	3461.22	2882179.93	5200100.00	0.66	241.89	1486.13	3461.22	4323269.89	5861520.00	0.49
74	222.33	1483.82	3461.22	2804211.20	5463100.00	0.71	220.55	1483.68	3461.22	4206316.80	6103200.00	0.53
75	221.31	1485.38	3664.33	2789974.07	5496350.00	0.68	219.56	1482.41	3664.33	4184961.10	5869680.00	0.48
76	219.53	1484.14	3664.33	2784284.16	5376410.00	0.67	218.41	1482.52	3664.33	4176426.24	6089040.00	0.50
77	219.03	1471.89	3664.33	2542713.60	4748230.00	0.64	215.84	1473.33	3664.33	3814070.40	6068880.00	0.55
78	218.02	1474.72	3583.93	2766579.20	4863890.00	0.62	216.70	1480.99	3583.93	4149868.80	6050640.00	0.51
79	222.37	1481.48	3583.93	2993688.32	5523101.00	0.65	220.19	1488.48	3583.93	4490532.48	6087600.00	0.48
80	220.69	1481.43	3583.93	2914499.84	5370320.00	0.65	218.01	1485.64	3583.93	4371749.76	6084240.00	0.49
81	219.32	1485.39	3571.24	2892512.00	5511450.00	0.68	217.33	1484.18	3571.24	4338768.00	6024000.00	0.49
82	220.97	1488.47	3571.24	2900495.36	5468490.00	0.67	218.83	1482.80	3571.24	4350743.04	6142560.00	0.50
83	220.14	1477.03	3571.24	2698545.92	5001730.00	0.65	218.06	1477.57	3571.24	4047818.88	6031680.00	0.53
84	222.69	1420.63	3571.24	2877297.92	5446130.00	0.63	220.87	1486.10	3571.24	4315946.88	6032640.00	0.50
85	221.56	1479.44	3943.60	2832954.88	5383360.00	0.61	219.65	1484.57	3943.60	4249432.32	5948160.00	0.45
86	214.34	1457.90	3943.60	2458624.00	4868360.00	0.62	212.74	1464.95	3943.60	3687936.00	5806320.00	0.50
87	218.47	1482.60	3943.60	2970266.88	5519140.00	0.60	217.35	1483.27	3943.60	4455400.32	5905920.00	0.43
88	218.72	1483.05	3943.60	2985472.00	5566600.00	0.60	217.22	1487.30	3943.60	4478208.00	5925120.00	0.43
89	217.99	1481.75	3774.34	2965733.12	5492160.00	0.62	216.95	1482.83	3774.34	4448599.68	5970720.00	0.45
90	218.98	1480.53	3774.34	2991618.56	5600420.00	0.63	217.48	1481.28	3774.34	4487427.84	5941440.00	0.44
91	218.47	1452.15	3592.40	2711520.00	4472300.00	0.57	217.47	1483.29	3592.40	4067280.00	5792160.00	0.50
92	120.43	1199.28	3592.40	2142981.12	7430.00	0.00	218.35	1485.69	3592.40	3214471.68	5971200.00	0.66
93	134.54	1209.13	3892.82	2288357.12	1201500.00	0.14	217.48	1480.67	3892.82	3432535.68	5971920.00	0.56
94	219.51	1485.25	3892.82	2932616.96	5337730.00	0.59	217.83	1485.30	3892.82	4398925.44	5966880.00	0.44
95	220.47	1482.88	3892.82	2920933.12	5507620.00	0.61	219.04	1483.55	3892.82	4381399.68	6079680.00	0.45
96	221.82	1452.81	3892.82	2864001.28	5556800.00	0.61	220.20	1482.39	3892.82	4296001.92	6084240.00	0.46

97	219.12	1473.30	3892.82	2854736.64	5399870.00	0.61	217.67	1483.47	3892.82	4282104.96	6026880.00	0.46
98	218.95	1473.67	3892.82	2587925.76	5519440.00	0.69	217.61	1470.24	3892.82	3881888.64	5961360.00	0.49
99	219.42	1476.35	3850.51	2779481.60	5245490.00	0.62	217.64	1482.15	3850.51	4169222.40	6020400.00	0.47
100	218.68	1482.05	3850.51	2864529.92	5389240.00	0.62	217.04	1484.60	3850.51	4296794.88	5978640.00	0.46
101	220.92	1480.77	3850.51	2921551.36	5339980.00	0.60	219.00	1485.16	3850.51	4382327.04	5827200.00	0.44
102	221.03	1479.71	3850.51	2780372.22	5249380.00	0.62	223.68	1478.03	3850.51	4170558.34	5945520.00	0.46
103	216.94	1475.80	3850.51	2571484.81	5118949.57	0.65	215.75	1469.99	3850.51	3857227.21	6045360.00	0.51
104	222.58	1480.48	3655.87	2856381.25	5405580.00	0.65	220.89	1482.78	3655.87	4284571.87	6110400.00	0.49
105	220.12	1482.90	3846.28	2912960.51	5204160.00	0.59	217.35	1478.28	3846.28	4369440.77	10291840.00	0.77
106	221.55	1475.46	38462.76	2449129.76	5189390.00	0.07	218.85	1479.96	3846.28	4198508.16	8393050.00	0.66
107	220.35	1473.85	38462.76	2510595.36	5438970.00	0.07	218.37	1482.20	3846.28	4303877.76	8677980.00	0.66
108	208.27	1453.65	3579.70	2508583.62	5157310.00	0.72	206.94	1459.34	3579.70	4300429.06	8346720.00	0.68
109	223.36	1472.73	3579.70	2799005.44	5372360.00	0.67	221.91	1477.60	3579.70	4236341.76	8597840.00	0.71
110	222.07	1480.29	3579.70	2869251.84	5322960.00	0.65	220.89	1479.46	3579.70	4291248.71	8628140.00	0.71
111	219.01	1481.68	3579.70	2866952.70	5359140.00	0.66	218.37	1482.38	3579.70	4353955.20	8773470.00	0.71
112	224.03	1483.04	3579.70	2824227.84	5468640.00	0.68	222.92	1485.75	3579.70	4248330.24	8665200.00	0.72
113	218.41	1477.90	3499.31	2860832.47	5093050.00	0.64	217.35	1476.75	3499.31	3963063.55	8096340.00	0.74
114	221.32	1474.16	3499.31	2902636.80	5238860.00	0.65	219.87	1481.82	3499.31	4086838.56	8770320.00	0.77
115	220.12	1480.72	3499.31	2832220.16	5287040.00	0.67	218.85	1478.44	3499.31	4151034.62	8663820.00	0.75
116	218.92	1471.69	3884.36	2642042.37	4898840.00	0.60	217.35	1478.44	3884.36	4044737.28	8796430.00	0.71
117	172.44	1191.11	3884.36	2724559.04	0.00	0.00	216.34	1483.50	3884.36	3120257.28	8768210.00	0.92
118	194.56	1165.50	3884.36	2767356.42	0.00	0.00	219.87	1481.25	3884.36	3087749.06	8766020.00	0.92
119	110.37	1170.00	3850.51	2696491.52	0.00	0.00	219.87	1480.69	3850.51	3020147.65	8790500.00	0.95
120	204.06	1431.82	3850.51	2080171.52	4418630.00	0.68	216.34	1471.12	3850.51	3908782.08	8270120.00	0.69
121	219.05	1477.07	3736.26	2058499.37	5397540.00	0.88	218.37	1477.31	3736.26	4223882.88	8681620.00	0.69
122	219.52	1479.77	3736.26	2013431.77	5486380.00	0.92	218.85	1476.75	3736.26	4223231.04	8565040.00	0.68
123	219.77	1480.78	3736.26	2605854.72	5499420.00	0.71	218.37	1480.69	3736.26	4359969.60	8710630.00	0.67
124	218.59	1477.50	3736.26	2815921.92	5461270.00	0.65	218.85	1482.94	3736.26	4424622.72	8774930.00	0.67
125	219.92	1475.82	3736.26	2815487.36	5371180.00	0.64	220.89	1480.13	3736.26	4409427.46	8723350.00	0.67
126	215.61	1473.62	3736.26	2906646.40	5136830.00	0.60	216.34	1473.94	3736.26	4188649.92	8197170.00	0.66
127	215.55	1477.70	3736.26	2949748.48	5146440.00	0.59	216.34	1472.81	3736.26	4032314.50	8214200.00	0.69
128	220.04	1464.30	3736.26	2939618.30	4822990.00	0.55	212.28	1476.19	3736.26	4084718.40	8555340.00	0.71
129	220.04	1476.91	3858.97	2792433.28	5291140.00	0.62	217.35	1482.38	3858.97	4282880.45	8573900.00	0.66
130	220.53	1473.84	3858.97	2688209.66	5357030.00	0.65	218.85	1480.13	3858.97	4331140.80	8719570.00	0.66

131	218.91	1475.65	3952.06	2723145.60	5203250.00	0.61	217.35	1480.69	3952.06	4245050.88	8704110.00	0.66
132	217.17	1478.55	3952.06	2855253.63	5079630.00	0.57	216.34	1477.88	3952.06	4183415.04	8478980.00	0.65
133	220.53	1480.08	3952.06	2887427.20	5315610.00	0.59	218.85	1482.94	3952.06	4452672.00	8569200.00	0.62
134	219.87	1477.67	3825.12	2830033.92	4972110.00	0.58	218.85	1475.06	3825.12	4363208.64	7968480.00	0.60
135	220.84	1472.65	3825.12	2788943.36	5044490.00	0.59	218.85	1479.56	3825.12	4635106.56	8466790.00	0.60
136	218.52	1464.30	3287.74	2968448.00	4304470.00	0.55	215.32	1468.87	3287.74	4146172.80	7479300.00	0.69
137	219.66	1475.70	3287.74	2908805.76	4951450.00	0.65	218.37	1481.25	3287.74	4607043.84	8396080.00	0.70
138	223.03	1475.01	3287.74	3090071.04	4873060.00	0.60	221.91	1480.13	3287.74	4718711.42	8502160.00	0.69
139	223.03	1476.13	3287.74	2764115.20	4990960.00	0.69	221.91	1479.00	3287.74	4258786.56	8601180.00	0.77
140	219.67	1457.74	3287.74	3071362.56	4750920.00	0.58	218.37	1484.07	3287.74	4298969.47	8792850.00	0.79
141	217.31	1476.08	4036.69	3145807.62	5468640.00	0.54	216.34	1476.19	4036.69	4251569.28	8437710.00	0.62
142	218.47	1473.58	4036.69	2839191.04	5024070.00	0.55	217.35	1486.88	4036.69	4513172.16	9168360.00	0.64
143	218.47	1480.49	4036.69	2865979.65	4929090.00	0.54	217.35	1484.63	4036.69	4510321.54	9137540.00	0.64
144	219.22	1474.86	3706.64	2834379.52	5039850.00	0.60	218.37	1475.62	3706.64	4574270.40	8703570.00	0.65
145	220.24	1475.24	3706.64	3008781.44	4941290.00	0.56	218.85	1482.94	3706.64	4563447.17	8886860.00	0.66
146	220.24	1476.92	3706.64	3006881.02	4975430.00	0.56	218.85	1477.31	3706.64	4422026.11	8782540.00	0.67
147	220.39	1476.36	3846.28	3049513.60	5020890.00	0.54	218.85	1481.82	3846.28	4372905.60	8756290.00	0.66
148	219.87	1475.31	3846.28	3042298.11	4908500.00	0.53	218.37	1475.06	3846.28	3730867.39	8709810.00	0.76
149	213.69	1476.36	3930.90	2948017.41	4409800.00	0.48	211.26	1465.49	3930.90	3708815.04	7743090.00	0.67
150	215.72	1407.55	3930.90	2915270.40	3560600.00	0.37	211.26	1466.62	3930.90	3153024.00	8073010.00	0.82
151	216.73	1472.98	3930.90	2487244.93	5029220.00	0.65	215.32	1480.69	3930.90	4085760.00	8635590.00	0.68
152	216.85	1472.98	3930.90	2472543.36	4918150.00	0.64	216.34	1481.82	3930.90	4051017.60	8630350.00	0.69
153	218.85	1483.67	3930.90	2102016.00	5058240.00	0.77	217.35	1483.50	3930.90	4033162.56	8419410.00	0.67
154	219.87	1473.54	3317.36	2723840.00	4890170.00	0.68	218.37	1486.32	3317.36	4081486.08	8648770.00	0.81
155	217.76	1476.36	3317.36	2700678.40	4957240.00	0.70	216.34	1481.25	3317.36	3901396.80	8347210.00	0.82
156	219.87	1479.73	3643.17	2688775.04	5011620.00	0.64	218.37	1482.94	3643.17	3918311.04	8545820.00	0.76
157	218.85	1473.54	3643.17	2720990.72	4971020.00	0.63	218.37	1482.94	3643.17	3916155.26	8324960.00	0.74
158	219.87	1478.04	3643.17	2600931.20	4952160.00	0.66	218.37	1482.38	3643.17	3946635.84	8525010.00	0.75
159	218.85	1478.80	3643.17	2612207.36	4925770.00	0.65	218.37	1482.94	3643.17	3967165.44	8452830.00	0.74
160	219.87	1477.67	3643.17	2610770.18	4929500.00	0.65	218.37	1480.69	3643.17	3913271.04	8519140.00	0.75
161	218.85	1476.55	3643.17	2631090.56	4780920.00	0.63	216.34	1482.94	3643.17	3914156.95	7929520.00	0.70
162	217.76	1465.29	3258.12	2644776.96	4806670.00	0.70	217.35	1476.75	3258.12	4251998.52	8040130.00	0.73
163	219.87	1475.98	3258.12	2608847.36	4806670.00	0.71	218.85	1477.31	3258.12	4664829.12	8095130.00	0.67
164	215.73	1464.73	3258.12	2609437.97	4517090.00	0.66	215.32	1468.87	3258.12	3935168.83	7660160.00	0.75

165	221.91	1470.92	3249.66	2834665.68	4995841.00	0.68	218.37	1479.00	3249.66	4148448.19	8228580.00	0.77
166	211.67	1471.48	3249.66	3109886.08	4658771.00	0.58	212.28	1470.00	3249.66	3816086.40	7694410.00	0.78
Desvest	59.41	131.10	3818.91	295798.04	1178719.64	0.17	6.93	22.83	269.40	440887.38	1321381.70	0.12
Promedio	220.34	1454.90	4070.77	2786050.09	4804210.74	0.59	217.16	1478.54	3653.70	4183275.37	6941913.01	0.58

Tabla C.2 Cálculo de Aire y Oxígeno y cantidad de gases para la combustión Caldera No. 6

Caldera No. 6								
	Entra al hogar			Gases de la combustión				
zafra	Masa de bagazo kg/día	O2 necesario para la combustión kg/día	aire necesario para la combustión kg/día	Nitrógeno kg/día	Oxígeno kg/día	Agua kg/día	Dióxido de carbono kg/día	ceniza kg/día
1	704.20	930.25	4018.19	2807.93	141.67	835.86	918.03	18.89
2	1077.26	1423.06	6146.85	4295.45	216.72	1278.67	1404.37	28.90
3	1362.48	1799.84	7774.33	5432.75	274.10	1617.22	1776.20	36.55
4	1358.53	1794.62	7751.76	5416.98	273.31	1612.52	1771.04	36.44
5	969.06	1280.12	5529.43	3864.00	194.95	1150.23	1263.31	25.99
6	1108.80	1464.72	6326.81	4421.22	223.07	1316.10	1445.48	29.74
7	1426.40	1884.27	8139.04	5687.61	286.96	1693.08	1859.52	38.26
8	1251.60	1653.36	7141.63	4990.61	251.80	1485.60	1631.64	33.57
9	1227.20	1621.13	7002.40	4893.32	246.89	1456.64	1599.83	32.92
10	1261.60	1666.57	7198.69	5030.49	253.81	1497.47	1644.68	33.84
11	1307.60	1727.34	7461.17	5213.91	263.06	1552.07	1704.65	35.08
12	1173.72	1550.49	6697.27	4680.09	236.13	1393.17	1530.12	31.48
13	1328.00	1754.29	7577.57	5295.25	267.17	1576.29	1731.24	35.62
14	1295.27	1711.05	7390.80	5164.74	260.58	1537.43	1688.57	34.74
15	1287.12	1700.28	7344.28	5132.23	258.94	1527.76	1677.94	34.53
16	1333.82	1761.97	7610.75	5318.44	268.34	1583.19	1738.82	35.78
17	1354.40	1789.16	7728.21	5400.52	272.48	1607.62	1765.66	36.33
18	1296.40	1712.54	7397.26	5169.25	260.81	1538.78	1690.05	34.77
19	1439.60	1901.71	8214.36	5740.24	289.62	1708.75	1876.73	38.62

20	1429.60	1888.50	8157.30	5700.37	287.61	1696.88	1863.69	38.35
21	1426.94	1884.98	8142.10	5689.75	287.07	1693.72	1860.22	38.28
22	563.01	743.74	3212.53	2244.94	113.27	668.27	733.96	15.10
23	1147.46	1515.80	6547.42	4575.38	230.85	1361.99	1495.89	30.78
24	1351.81	1785.73	7713.40	5390.17	271.96	1604.54	1762.28	36.26
25	1357.31	1793.01	7744.84	5412.14	273.06	1611.08	1769.46	36.41
26	1374.84	1816.16	7844.84	5482.02	276.59	1631.88	1792.31	36.88
27	1319.92	1743.61	7531.44	5263.01	265.54	1566.69	1720.70	35.41
28	1356.63	1792.11	7740.93	5409.41	272.93	1610.27	1768.57	36.39
29	1312.29	1733.54	7487.95	5232.63	264.01	1557.64	1710.77	35.20
30	1360.81	1797.63	7764.77	5426.07	273.77	1615.23	1774.01	36.50
31	1337.01	1766.19	7628.97	5331.17	268.98	1586.98	1742.99	35.86
32	1348.01	1780.72	7691.74	5375.03	271.19	1600.04	1757.33	36.16
33	1324.72	1749.95	7558.83	5282.16	266.51	1572.39	1726.96	35.53
34	1307.60	1727.34	7461.17	5213.91	263.06	1552.07	1704.65	35.08
35	931.12	1230.01	5312.97	3712.74	187.32	1105.20	1213.85	24.98
36	983.53	1299.24	5612.01	3921.71	197.87	1167.41	1282.17	26.38
37	1046.18	1382.01	5969.53	4171.54	210.47	1241.78	1363.85	28.06
38	1348.22	1781.00	7692.94	5375.88	271.23	1600.29	1757.60	36.16
39	1300.43	1717.87	7420.26	5185.33	261.62	1543.56	1695.30	34.88
40	1345.84	1777.85	7679.36	5366.39	270.76	1597.46	1754.50	36.10
41	1361.38	1798.39	7768.06	5428.37	273.88	1615.91	1774.76	36.52
42	1373.54	1814.45	7837.44	5476.85	276.33	1630.34	1790.62	36.84
43	1384.27	1828.62	7898.63	5519.61	278.49	1643.07	1804.60	37.13
44	1367.00	1805.80	7800.08	5450.74	275.01	1622.57	1782.08	36.67
45	1353.20	1787.58	7721.36	5395.73	272.24	1606.20	1764.09	36.30

46	1329.86	1756.74	7588.16	5302.65	267.54	1578.49	1733.66	35.67
47	1353.34	1787.77	7722.18	5396.31	272.27	1606.37	1764.28	36.30
48	1327.81	1754.04	7576.50	5294.50	267.13	1576.06	1731.00	35.62
49	1350.40	1783.88	7705.38	5384.57	271.67	1602.87	1760.44	36.22
50	1238.67	1636.28	7067.84	4939.05	249.20	1470.25	1614.79	33.23
51	1357.26	1792.95	7744.55	5411.94	273.05	1611.02	1769.39	36.41
52	1318.10	1741.20	7521.06	5255.76	265.17	1564.53	1718.33	35.36
53	1366.07	1804.57	7794.77	5447.03	274.83	1621.47	1780.87	36.64
54	1335.78	1764.57	7621.96	5326.27	268.73	1585.52	1741.38	35.83
55	1330.50	1757.59	7591.83	5305.22	267.67	1579.25	1734.50	35.69
56	1337.32	1766.59	7630.73	5332.40	269.04	1587.34	1743.39	35.87
57	1397.20	1845.70	7972.42	5571.18	281.09	1658.42	1821.45	37.48
58	798.01	1054.17	4553.46	3181.98	160.54	947.21	1040.33	21.41
59	1113.33	1470.71	6352.67	4439.29	223.98	1321.48	1451.39	29.86
60	1242.01	1640.69	7086.90	4952.37	249.87	1474.22	1619.14	33.32
61	1248.09	1648.72	7121.59	4976.61	251.09	1481.43	1627.07	33.48
62	1241.25	1639.69	7082.58	4949.35	249.72	1473.32	1618.15	33.30
63	1245.38	1645.14	7106.13	4965.81	250.55	1478.22	1623.53	33.41
64	1180.36	1559.25	6735.11	4706.54	237.46	1401.04	1538.77	31.66
65	1220.32	1612.04	6963.15	4865.89	245.50	1448.47	1590.87	32.73
66	1220.53	1612.32	6964.36	4866.74	245.55	1448.73	1591.14	32.74
67	1274.86	1684.10	7274.37	5083.38	256.48	1513.22	1661.97	34.20
68	1267.66	1674.58	7233.27	5054.65	255.03	1504.66	1652.58	34.00
69	1238.33	1635.84	7065.92	4937.71	249.13	1469.85	1614.35	33.22
70	1255.88	1659.01	7166.03	5007.67	252.66	1490.68	1637.22	33.69
71	1084.39	1432.48	6187.52	4323.87	218.16	1287.13	1413.66	29.09

72	1196.44	1580.50	6826.90	4770.68	240.70	1420.13	1559.74	32.09
73	1286.69	1699.71	7341.84	5130.52	258.86	1527.25	1677.39	34.51
74	1251.88	1653.73	7143.23	4991.73	251.85	1485.93	1632.01	33.58
75	1245.52	1645.34	7106.96	4966.39	250.57	1478.39	1623.72	33.41
76	1242.98	1641.98	7092.47	4956.26	250.06	1475.37	1620.41	33.34
77	1135.14	1499.52	6477.11	4526.24	228.37	1347.37	1479.82	30.45
78	1235.08	1631.54	7047.37	4924.74	248.47	1465.99	1610.11	33.13
79	1336.47	1765.47	7625.89	5329.02	268.87	1586.34	1742.28	35.85
80	1301.12	1718.77	7424.17	5188.05	261.76	1544.38	1696.20	34.90
81	1291.30	1705.81	7368.16	5148.91	259.78	1532.72	1683.40	34.64
82	1294.86	1710.52	7388.49	5163.12	260.50	1536.95	1688.04	34.73
83	1204.71	1591.42	6874.06	4803.64	242.36	1429.94	1570.51	32.32
84	1284.51	1696.84	7329.40	5121.83	258.42	1524.66	1674.54	34.46
85	1264.71	1670.68	7216.45	5042.90	254.43	1501.17	1648.74	33.92
86	1097.60	1449.93	6262.91	4376.56	220.82	1302.81	1430.88	29.44
87	1326.01	1751.66	7566.22	5287.32	266.77	1573.93	1728.65	35.57
88	1332.80	1760.63	7604.96	5314.39	268.13	1581.98	1737.50	35.75
89	1323.99	1748.99	7554.68	5279.25	266.36	1571.52	1726.01	35.51
90	1335.54	1764.25	7620.61	5325.33	268.68	1585.24	1741.08	35.82
91	1210.50	1599.07	6907.11	4826.73	243.53	1436.82	1578.06	32.47
92	956.69	1263.78	5458.86	3814.69	192.47	1135.55	1247.18	25.66
93	1021.59	1349.52	5829.18	4073.47	205.52	1212.59	1331.79	27.40
94	1309.20	1729.46	7470.32	5220.30	263.39	1553.98	1706.74	35.12
95	1303.99	1722.57	7440.56	5199.51	262.34	1547.78	1699.94	34.98
96	1278.57	1688.99	7295.53	5098.16	257.22	1517.62	1666.81	34.30
97	1274.44	1683.53	7271.93	5081.67	256.39	1512.71	1661.41	34.19

98	1155.32	1526.18	6592.28	4606.72	232.43	1371.33	1506.13	30.99
99	1240.84	1639.15	7080.23	4947.71	249.63	1472.83	1617.62	33.28
100	1278.81	1689.31	7296.88	5099.10	257.27	1517.90	1667.11	34.30
101	1304.26	1722.93	7442.13	5200.61	262.39	1548.11	1700.30	34.99
102	1241.24	1639.67	7082.50	4949.30	249.71	1473.30	1618.13	33.29
103	1147.98	1516.49	6550.40	4577.46	230.95	1362.61	1496.57	30.79
104	1275.17	1684.50	7276.12	5084.60	256.54	1513.58	1662.37	34.21
105	1300.43	1717.87	7420.25	5185.31	261.62	1543.56	1695.30	34.88
106	1249.56	1650.66	7129.97	4982.46	251.39	1483.18	1628.98	33.52
107	1280.92	1692.09	7308.91	5107.51	257.69	1520.40	1669.86	34.36
108	1279.89	1690.73	7303.05	5103.42	257.49	1519.18	1668.52	34.33
109	1260.82	1665.54	7194.22	5027.36	253.65	1496.54	1643.66	33.82
110	1277.16	1687.12	7287.46	5092.52	256.94	1515.94	1664.96	34.26
111	1295.82	1711.78	7393.95	5166.94	260.69	1538.09	1689.29	34.76
112	1264.38	1670.25	7214.58	5041.59	254.37	1500.78	1648.31	33.92
113	1179.48	1558.10	6730.13	4703.06	237.29	1400.00	1537.63	31.64
114	1216.32	1606.76	6940.33	4849.94	244.70	1443.73	1585.65	32.63
115	1235.43	1632.00	7049.35	4926.13	248.54	1466.40	1610.56	33.14
116	1203.79	1590.21	6868.83	4799.98	242.18	1428.85	1569.32	32.29
117	928.65	1226.74	5298.87	3702.88	186.83	1102.27	1210.63	24.91
118	918.97	1213.96	5243.66	3664.30	184.88	1090.79	1198.02	24.65
119	898.85	1187.39	5128.86	3584.08	180.83	1066.90	1171.79	24.11
120	1163.33	1536.76	6637.95	4638.64	234.04	1380.83	1516.57	31.21
121	1257.11	1660.64	7173.06	5012.58	252.90	1492.14	1638.82	33.72
122	1256.91	1660.38	7171.95	5011.80	252.87	1491.91	1638.57	33.72
123	1297.61	1714.14	7404.16	5174.07	261.05	1540.21	1691.62	34.81

124	1316.85	1739.56	7513.96	5250.80	264.92	1563.05	1716.71	35.32
125	1312.33	1733.59	7488.15	5232.77	264.01	1557.69	1710.81	35.20
126	1246.62	1646.79	7113.23	4970.77	250.80	1479.69	1625.15	33.44
127	1200.09	1585.32	6847.73	4785.24	241.43	1424.47	1564.50	32.19
128	1215.69	1605.93	6936.73	4847.43	244.57	1442.98	1584.83	32.61
129	1274.67	1683.83	7273.25	5082.59	256.44	1512.98	1661.71	34.19
130	1289.03	1702.81	7355.21	5139.86	259.33	1530.03	1680.44	34.58
131	1263.41	1668.96	7209.01	5037.70	254.17	1499.62	1647.04	33.89
132	1245.06	1644.73	7104.34	4964.55	250.48	1477.84	1623.12	33.40
133	1325.20	1750.59	7561.59	5284.09	266.60	1572.96	1727.59	35.55
134	1298.57	1715.42	7409.66	5177.92	261.25	1541.36	1692.88	34.83
135	1379.50	1822.31	7871.40	5500.59	277.53	1637.41	1798.37	37.00
136	1233.98	1630.09	7041.09	4920.36	248.25	1464.69	1608.67	33.10
137	1371.14	1811.28	7823.75	5467.28	275.85	1627.50	1787.49	36.78
138	1404.38	1855.18	8013.38	5599.80	282.53	1666.94	1830.81	37.67
139	1267.50	1674.36	7232.33	5054.00	254.99	1504.47	1652.37	34.00
140	1279.46	1690.16	7300.57	5101.68	257.40	1518.66	1667.96	34.32
141	1265.35	1671.52	7220.08	5045.43	254.56	1501.92	1649.57	33.94
142	1343.21	1774.38	7664.33	5355.88	270.23	1594.33	1751.07	36.03
143	1342.36	1773.25	7659.49	5352.50	270.06	1593.33	1749.96	36.01
144	1361.39	1798.40	7768.09	5428.39	273.88	1615.92	1774.77	36.52
145	1358.17	1794.14	7749.71	5415.55	273.24	1612.09	1770.57	36.43
146	1316.08	1738.54	7509.55	5247.72	264.77	1562.14	1715.70	35.30
147	1301.46	1719.23	7426.13	5189.43	261.83	1544.78	1696.64	34.91
148	1110.38	1466.81	6335.81	4427.50	223.39	1317.98	1447.54	29.78
149	1103.81	1458.14	6298.36	4401.33	222.07	1310.19	1438.98	29.61

150	938.40	1239.63	5354.51	3741.76	188.79	1113.85	1223.34	25.17
151	1216.00	1606.34	6938.50	4848.66	244.63	1443.35	1585.23	32.62
152	1205.66	1592.68	6879.50	4807.43	242.55	1431.07	1571.75	32.34
153	1200.35	1585.66	6849.17	4786.24	241.49	1424.77	1564.83	32.20
154	1214.73	1604.66	6931.24	4843.59	244.38	1441.84	1583.58	32.58
155	1161.13	1533.85	6625.41	4629.88	233.60	1378.22	1513.70	31.15
156	1166.16	1540.50	6654.13	4649.95	234.61	1384.19	1520.27	31.28
157	1165.52	1539.66	6650.47	4647.39	234.48	1383.43	1519.43	31.26
158	1174.59	1551.64	6702.23	4683.56	236.30	1394.20	1531.26	31.51
159	1180.70	1559.71	6737.10	4707.92	237.53	1401.45	1539.22	31.67
160	1164.66	1538.52	6645.57	4643.97	234.31	1382.41	1518.31	31.24
161	1164.93	1538.87	6647.08	4645.02	234.36	1382.72	1518.65	31.25
162	1265.48	1671.69	7220.80	5045.94	254.59	1502.07	1649.73	33.95
163	1388.34	1834.00	7921.88	5535.86	279.31	1647.91	1809.91	37.24
164	1171.18	1547.13	6682.76	4669.95	235.62	1390.15	1526.81	31.42
165	1234.66	1630.98	7044.95	4923.06	248.39	1465.49	1609.56	33.12
166	1135.74	1500.31	6480.53	4528.64	228.49	1348.08	1480.60	30.47
promedio	1245.02	1644.67	7104.10	4964.39	250.47	1477.79	1623.07	33.40
Desvest	131.22	173.34	748.72	523.21	26.40	155.75	171.06	3.52

Tabla C.3 Cálculo de Aire y Oxígeno y cantidad de gases para la combustión
Caldera No. 7

Caldera No. 7								
	Entra al hogar			Gases de la combustión				
zafra	Masa de bagazo kg/día	O2 necesario para la combustión kg/día	aire necesario para la combustión kg/día	Nitrógeno kg/día	Oxígeno kg/día	Agua kg/día	Dióxido de carbono kg/día	ceniza kg/día
1	1056.31	1395.38	6027.28	628.08	628.08	186.97	205.35	28.33
2	1615.89	2134.59	9220.27	960.81	960.81	286.01	314.13	43.34
3	2043.73	2699.76	11661.50	1215.20	1215.20	361.74	397.30	54.82
4	2037.79	2691.92	11627.64	1211.67	1211.67	360.69	396.15	54.66
5	1453.58	1920.18	8294.15	864.30	864.30	257.28	282.58	38.99
6	1663.20	2197.09	9490.22	988.94	988.94	294.39	323.33	44.61
7	2139.60	2826.41	12208.56	1272.21	1272.21	378.71	415.94	57.39
8	1877.40	2480.05	10712.44	1116.30	1116.30	332.30	364.97	50.36
9	1840.80	2431.70	10503.60	1094.54	1094.54	325.82	357.85	49.38
10	1892.40	2499.86	10798.03	1125.22	1125.22	334.95	367.88	50.76
11	1961.40	2591.01	11191.75	1166.25	1166.25	347.17	381.30	52.61
12	1760.59	2325.73	10045.90	1046.84	1046.84	311.62	342.26	47.23
13	1992.00	2631.43	11366.35	1184.44	1184.44	352.58	387.24	53.43
14	1942.90	2566.57	11086.20	1155.25	1155.25	343.89	377.70	52.12
15	1930.67	2550.42	11016.43	1147.98	1147.98	341.73	375.32	51.79
16	2000.72	2642.96	11416.13	1189.63	1189.63	354.13	388.94	53.67
17	2031.60	2683.74	11592.31	1207.99	1207.99	359.59	394.94	54.50
18	1944.60	2568.82	11095.89	1156.26	1156.26	344.19	378.03	52.16

19	2159.40	2852.57	12321.54	1283.98	1283.98	382.21	419.79	57.92
20	2144.40	2832.75	12235.95	1275.06	1275.06	379.56	416.87	57.52
21	2140.40	2827.47	12213.15	1272.68	1272.68	378.85	416.09	57.41
22	844.51	1115.60	4818.80	502.15	502.15	149.48	164.17	22.65
23	1721.19	2273.70	9821.13	1023.42	1023.42	304.65	334.60	46.17
24	2027.71	2678.60	11570.10	1205.68	1205.68	358.90	394.19	54.39
25	2035.97	2689.52	11617.26	1210.59	1210.59	360.37	395.79	54.61
26	2062.26	2724.25	11767.26	1226.22	1226.22	365.02	400.90	55.32
27	1979.87	2615.41	11297.16	1177.23	1177.23	350.44	384.89	53.11
28	2034.94	2688.16	11611.39	1209.98	1209.98	360.19	395.59	54.59
29	1968.44	2600.31	11231.93	1170.44	1170.44	348.41	382.66	52.80
30	2041.21	2696.44	11647.16	1213.70	1213.70	361.29	396.81	54.75
31	2005.51	2649.28	11443.45	1192.48	1192.48	354.98	389.87	53.80
32	2022.01	2671.08	11537.61	1202.29	1202.29	357.90	393.08	54.24
33	1987.08	2624.93	11338.25	1181.51	1181.51	351.71	386.29	53.30
34	1961.40	2591.01	11191.75	1166.25	1166.25	347.17	381.30	52.61
35	1396.68	1845.01	7969.46	830.47	830.47	247.21	271.51	37.46
36	1475.29	1948.86	8418.02	877.21	877.21	261.13	286.80	39.57
37	1569.28	2073.01	8954.29	933.09	933.09	277.76	305.07	42.09
38	2022.33	2671.50	11539.41	1202.48	1202.48	357.95	393.14	54.25
39	1950.65	2576.81	11130.40	1159.86	1159.86	345.26	379.21	52.32
40	2018.76	2666.78	11519.04	1200.35	1200.35	357.32	392.45	54.15
41	2042.08	2697.58	11652.09	1214.22	1214.22	361.45	396.98	54.78
42	2060.32	2721.68	11756.16	1225.06	1225.06	364.68	400.53	55.27
43	2076.40	2742.93	11847.95	1234.63	1234.63	367.52	403.65	55.70
44	2050.49	2708.70	11700.12	1219.22	1219.22	362.94	398.62	55.00

45	2029.80	2681.37	11582.04	1206.92	1206.92	359.27	394.59	54.45
46	1994.78	2635.11	11382.24	1186.10	1186.10	353.08	387.79	53.51
47	2030.02	2681.65	11583.27	1207.05	1207.05	359.31	394.64	54.45
48	1991.72	2631.06	11364.74	1184.28	1184.28	352.53	387.19	53.43
49	2025.60	2675.82	11558.07	1204.42	1204.42	358.53	393.78	54.33
50	1858.00	2454.42	10601.76	1104.77	1104.77	328.87	361.20	49.84
51	2035.90	2689.42	11616.82	1210.54	1210.54	360.35	395.78	54.61
52	1977.14	2611.81	11281.58	1175.61	1175.61	349.95	384.36	53.03
53	2049.10	2706.86	11692.15	1218.39	1218.39	362.69	398.34	54.97
54	2003.67	2646.85	11432.94	1191.38	1191.38	354.65	389.51	53.75
55	1995.75	2636.39	11387.75	1186.67	1186.67	353.25	387.97	53.53
56	2005.97	2649.89	11446.09	1192.75	1192.75	355.06	389.96	53.81
57	2095.80	2768.55	11958.63	1246.16	1246.16	370.96	407.42	56.22
58	1197.02	1581.26	6830.18	711.75	711.75	211.87	232.70	32.11
59	1670.00	2206.07	9529.01	992.98	992.98	295.59	324.65	44.80
60	1863.01	2461.04	10630.35	1107.75	1107.75	329.75	362.17	49.97
61	1872.13	2473.09	10682.39	1113.17	1113.17	331.37	363.94	50.22
62	1861.88	2459.54	10623.88	1107.07	1107.07	329.55	361.95	49.94
63	1868.07	2467.72	10659.19	1110.75	1110.75	330.65	363.15	50.11
64	1770.53	2338.88	10102.67	1052.76	1052.76	313.38	344.19	47.49
65	1830.48	2418.06	10444.72	1088.40	1088.40	323.99	355.85	49.10
66	1830.80	2418.49	10446.54	1088.59	1088.59	324.05	355.91	49.11
67	1912.30	2526.14	10911.56	1137.05	1137.05	338.48	371.75	51.30
68	1901.49	2511.87	10849.90	1130.63	1130.63	336.56	369.65	51.01
69	1857.50	2453.75	10598.88	1104.47	1104.47	328.78	361.10	49.83
70	1883.82	2488.52	10749.05	1120.12	1120.12	333.44	366.21	50.53

71	1626.58	2148.71	9281.28	967.17	967.17	287.90	316.21	43.63
72	1794.66	2370.75	10240.35	1067.11	1067.11	317.66	348.88	48.14
73	1930.03	2549.57	11012.76	1147.60	1147.60	341.62	375.20	51.77
74	1877.82	2480.60	10714.84	1116.55	1116.55	332.37	365.05	50.37
75	1868.29	2468.01	10660.44	1110.88	1110.88	330.69	363.19	50.11
76	1864.48	2462.97	10638.70	1108.62	1108.62	330.01	362.45	50.01
77	1702.71	2249.28	9715.66	1012.43	1012.43	301.38	331.01	45.67
78	1852.62	2447.31	10571.05	1101.57	1101.57	327.91	360.15	49.69
79	2004.70	2648.21	11438.83	1192.00	1192.00	354.83	389.71	53.77
80	1951.67	2578.16	11136.25	1160.47	1160.47	345.45	379.41	52.35
81	1936.95	2558.71	11052.24	1151.71	1151.71	342.84	376.54	51.96
82	1942.30	2565.77	11082.74	1154.89	1154.89	343.79	377.58	52.10
83	1807.06	2387.13	10311.10	1074.48	1074.48	319.85	351.29	48.47
84	1926.76	2545.25	10994.10	1145.65	1145.65	341.04	374.56	51.68
85	1897.07	2506.03	10824.67	1128.00	1128.00	335.78	368.79	50.89
86	1646.40	2174.89	9394.36	978.95	978.95	291.41	320.06	44.16
87	1989.02	2627.49	11349.34	1182.67	1182.67	352.06	386.67	53.35
88	1999.20	2640.94	11407.44	1188.72	1188.72	353.86	388.64	53.63
89	1985.98	2623.48	11332.01	1180.86	1180.86	351.52	386.07	53.27
90	2003.32	2646.38	11430.92	1191.17	1191.17	354.59	389.44	53.74
91	1815.75	2398.61	10360.67	1079.64	1079.64	321.39	352.98	48.71
92	1435.03	1895.68	8188.29	853.27	853.27	254.00	278.97	38.49
93	1532.38	2024.28	8743.77	911.15	911.15	271.23	297.90	41.10
94	1963.81	2594.19	11205.48	1167.68	1167.68	347.59	381.76	52.68
95	1955.98	2583.85	11160.83	1163.03	1163.03	346.21	380.24	52.47
96	1917.86	2533.49	10943.30	1140.36	1140.36	339.46	372.83	51.44

97	1911.65	2525.29	10907.90	1136.67	1136.67	338.36	371.63	51.28
98	1732.99	2289.27	9888.42	1030.43	1030.43	306.74	336.89	46.49
99	1861.26	2458.72	10620.35	1106.71	1106.71	329.44	361.83	49.93
100	1918.21	2533.96	10945.32	1140.57	1140.57	339.52	372.90	51.45
101	1956.40	2584.40	11163.20	1163.27	1163.27	346.28	380.32	52.48
102	1861.86	2459.51	10623.75	1107.06	1107.06	329.55	361.94	49.94
103	1721.98	2274.73	9825.60	1023.89	1023.89	304.79	334.75	46.19
104	1912.76	2526.75	10914.18	1137.32	1137.32	338.56	371.84	51.31
105	1950.64	2576.80	11130.37	1159.85	1159.85	345.26	379.21	52.32
106	1874.33	2476.00	10694.95	1114.48	1114.48	331.76	364.37	50.28
107	1921.37	2538.14	10963.36	1142.45	1142.45	340.08	373.52	51.54
108	1919.83	2536.10	10954.58	1141.53	1141.53	339.81	373.22	51.50
109	1891.22	2498.31	10791.32	1124.52	1124.52	334.75	367.65	50.73
110	1915.74	2530.69	10931.19	1139.10	1139.10	339.09	372.42	51.39
111	1943.73	2567.67	11090.92	1155.74	1155.74	344.04	377.86	52.14
112	1896.58	2505.38	10821.86	1127.70	1127.70	335.69	368.69	50.87
113	1769.22	2337.15	10095.20	1051.98	1051.98	313.15	343.94	47.46
114	1824.48	2410.14	10410.49	1084.84	1084.84	322.93	354.68	48.94
115	1853.14	2448.00	10574.02	1101.88	1101.88	328.01	360.25	49.71
116	1805.69	2385.31	10303.25	1073.66	1073.66	319.61	351.03	48.44
117	1392.97	1840.12	7948.30	828.26	828.26	246.56	270.79	37.37
118	1378.46	1820.94	7865.49	819.63	819.63	243.99	267.97	36.98
119	1348.28	1781.08	7693.29	801.69	801.69	238.65	262.11	36.17
120	1744.99	2305.13	9956.92	1037.57	1037.57	308.86	339.23	46.81
121	1885.66	2490.96	10759.59	1121.21	1121.21	333.76	366.57	50.58
122	1885.37	2490.58	10757.93	1121.04	1121.04	333.71	366.52	50.57

123	1946.42	2571.21	11106.24	1157.34	1157.34	344.52	378.38	52.21
124	1975.28	2609.34	11270.94	1174.50	1174.50	349.62	383.99	52.98
125	1968.49	2600.38	11232.23	1170.47	1170.47	348.42	382.68	52.80
126	1869.93	2470.18	10669.84	1111.86	1111.86	330.98	363.51	50.16
127	1800.14	2377.99	10271.60	1070.36	1070.36	318.62	349.95	48.29
128	1823.54	2408.89	10405.09	1084.27	1084.27	322.77	354.50	48.91
129	1912.00	2525.75	10909.87	1136.88	1136.88	338.42	371.69	51.29
130	1933.55	2554.21	11032.81	1149.69	1149.69	342.24	375.88	51.87
131	1895.11	2503.44	10813.51	1126.83	1126.83	335.43	368.41	50.83
132	1867.60	2467.09	10656.50	1110.47	1110.47	330.56	363.06	50.10
133	1987.80	2625.88	11342.39	1181.95	1181.95	351.84	386.43	53.32
134	1947.86	2573.12	11114.49	1158.20	1158.20	344.77	378.66	52.25
135	2069.24	2733.47	11807.11	1230.37	1230.37	366.26	402.26	55.51
136	1850.97	2445.13	10561.63	1100.59	1100.59	327.62	359.83	49.65
137	2056.72	2716.92	11735.62	1222.92	1222.92	364.04	399.83	55.17
138	2106.57	2782.78	12020.07	1252.57	1252.57	372.86	409.52	56.51
139	1901.24	2511.54	10848.50	1130.48	1130.48	336.52	369.60	51.00
140	1919.18	2535.24	10950.86	1141.15	1141.15	339.70	373.09	51.48
141	1898.02	2507.29	10830.11	1128.56	1128.56	335.95	368.98	50.91
142	2014.81	2661.56	11496.50	1198.01	1198.01	356.62	391.68	54.05
143	2013.54	2659.88	11489.24	1197.25	1197.25	356.40	391.43	54.01
144	2042.09	2697.59	11652.14	1214.22	1214.22	361.45	396.98	54.78
145	2037.25	2691.21	11624.57	1211.35	1211.35	360.59	396.04	54.65
146	1974.12	2607.81	11264.32	1173.81	1173.81	349.42	383.77	52.95
147	1952.19	2578.84	11139.20	1160.77	1160.77	345.54	379.51	52.37
148	1665.57	2200.21	9503.72	990.35	990.35	294.81	323.79	44.68

149	1655.72	2187.21	9447.54	984.49	984.49	293.06	321.87	44.41
150	1407.60	1859.44	8031.77	836.96	836.96	249.15	273.64	37.76
151	1824.00	2409.50	10407.74	1084.55	1084.55	322.85	354.59	48.93
152	1808.49	2389.02	10319.24	1075.33	1075.33	320.10	351.57	48.51
153	1800.52	2378.49	10273.76	1070.59	1070.59	318.69	350.02	48.30
154	1822.09	2406.98	10396.86	1083.42	1083.42	322.51	354.21	48.88
155	1741.70	2300.78	9938.11	1035.61	1035.61	308.28	338.59	46.72
156	1749.25	2310.75	9981.20	1040.10	1040.10	309.62	340.05	46.92
157	1748.28	2309.48	9975.71	1039.53	1039.53	309.45	339.87	46.90
158	1761.89	2327.46	10053.35	1047.62	1047.62	311.85	342.51	47.26
159	1771.06	2339.56	10105.65	1053.07	1053.07	313.48	344.29	47.51
160	1747.00	2307.78	9968.36	1038.76	1038.76	309.22	339.62	46.86
161	1747.39	2308.30	9970.62	1039.00	1039.00	309.29	339.69	46.87
162	1898.21	2507.54	10831.21	1128.68	1128.68	335.98	369.01	50.92
163	2082.51	2751.00	11882.82	1238.26	1238.26	368.60	404.84	55.86
164	1756.77	2320.70	10024.14	1044.58	1044.58	310.95	341.52	47.12
165	1851.99	2446.47	10567.43	1101.19	1101.19	327.80	360.03	49.68
166	1703.61	2250.47	9720.80	1012.97	1012.97	301.54	331.18	45.70
promedio	1867.53	2467.01	10656.15	1110.44	1110.44	330.55	363.05	50.09
Desvest	196.82	260.01	1123.08	117.03	117.03	34.84	38.26	5.28

APENDICE D

Cálculos realizados para obtención de resultados

Cálculos Realizados en la obtención de resultados

A continuación se muestran un ejemplo de los cálculos realizados a partir de los datos promedios recolectados en cada día de zafra.

1. Cálculos de Eficiencia térmicas de las calderas:

$$\eta: \frac{m_v * (H_v - H_a)}{m_B * PC_B}$$

η : eficiencia térmica de la caldera.

H_v : entalpia de vapor, Btu/lbm.

H_a : entalpia del agua, Btu/lbm.

m_B : masa de bagazo. Lbm/dia.

m_v : masa de vapor. Lbm/dia.

PC_B : poder calórico del bagazo, Btu/lbm.

Cálculo para el día de zafra 20

Caldera No. 6

$$\eta: \frac{5190000 \text{ Lbm/dia} * (1483.728744 - 225.43458) \text{ Btu/lbm}}{3,202,304 \text{ Lbm/dia} * 3,059.248943 \text{ Btu/lbm}} = 0.67$$

Caldera No. 7

$$\eta: \frac{8477550 \text{ Lbm/dia} * (1488.343704 - 221.53947) \text{ Btu/lbm}}{4,803,456 \text{ Lbm/dia} * 3,059.248943 \text{ Btu/lbm}} = 0.73$$

2. Cálculo de la combustión

En base seca del bagazo

Elemento del bagazo	Peso molecular
C: 47%	12
H: 6.5%	1
O: 46%	16

2.1. Cantidad teórica de aire para la combustión

Por cada kilogramo de bagazo

$$C = 0.465 \text{ kg} * 2.67 = 1.241 \text{ kg } O_2 = 0.869 \text{ m}^3 \text{ de oxígeno}$$

$$H_2 = 0.065 \text{ kg} * 8 = 0.52 \text{ kg } O_2 = 0.364 \text{ m}^3 \text{ de oxígeno}$$

$$O_2 = 1.241 \text{ kg } O_2 + 0.52 \text{ kg } O_2 = 1.761 \text{ kg } O_2 = 1.233 \text{ m}^3 \text{ de oxígeno}$$

$$\text{Como el bagazo contiene oxígeno: } 0.440 \text{ kg } O_2 = 0.308 \text{ m}^3 \text{ de oxígeno}$$

El aire debe proporcionar

$$= 1.761 \text{ kg } O_2 - 0.440 \text{ kg } O_2 = 1.321 \text{ kg } O_2 = 0.925 \text{ m}^3 \text{ de oxígeno}$$

$$\text{Calculando el nitrógeno} = \frac{1.321 \text{ kg } O_2 * 76.85 \text{ N}_2}{23.15 \text{ O}_2} = 4.385 \text{ kg } N_2 = 3.508 \text{ m}^3 \text{ N}_2$$

Aire necesario para la combustión por kg de bagazo

$$\text{Aire} = 1.321 \text{ kg } O_2 + 4.385 \text{ kg } N_2 = 5.706 \text{ kg de aire} = 4.42 \text{ m}^3 \text{ de aire.}$$

2.2. Cantidad de gases de combustión

a. Composición de los gases con exceso de aire de 20% promedio.

w = humedad del bagazo, m = masa del aire

P_g = Peso total de los gases

$$P_g = 5.706 (1 - w) m + 1$$

$$P_g = 5.706 (1 - 0.50) 1.20 + 1 = 4.423 \text{ kg}$$

Peso individual de los gases

b. Nitrógeno, N_2

$$N_2 = 4.385 (1 - w) m$$

$$N_2 = 4.385 (1 - 0.50) 1.20 = 2.631 \text{ kg}$$

c. Oxígeno, O_2

$$O_2 = 1.321 (1 - w) * (m - 1)$$

$$O_2 = 1.321 (1 - 0.50) * (1.20 - 1) = 0.132 \text{ kg}$$

d. Agua, H_2O

$$H_2O = 0.565 (1 - w) + w$$

$$H_2O = 0.565 (1 - 0.50) + 0.50 = 0.783 \text{ kg}$$

e. Dióxido de carbono, CO_2

$$CO_2 = 1.72 (1 - w)$$

$$CO_2 = 1.72 (1 - 0.50) = 0.86 \text{ kg}$$

Gases	Peso kg	Porcentaje
Nitrógeno	2.631	59.5
Oxígeno	0.132	3
Agua	0.783	17.70
Dióxido de carbono	0.86	19.44
Ceniza	0.017	0.40
Total	4.423	100

La diferencia entre peso total calculado individual por gases y P_g es el contenido de ceniza.

ε = Contenido de ceniza

$$\varepsilon = P_g - \Sigma \text{total peso individual} = 4.423 - 4.406 = 0.017 \text{ kg}$$

3. Cálculos de los calentadores No. 2 y No. 3 del Ingenio Monte Rosa

2.3. Cálculos del calentador No. 2

Balance de masa

$$\text{masa entra} - \text{masa salida} = \text{masa acumulada}$$

$$\text{masa entra} = \text{masa salida}$$

$$w1 + w2 = w3$$

$$w3 = w4$$

Balance de energía

$$\text{energía entra} - \text{energía salida} = \text{energía acumulada}$$

$$w1h1 + w2h2 = w3h3$$

$$h1 = w3h3 - \frac{w2h2}{w1}$$

criterios utilizados en los
2 calculos de temp.
de los calentadores

Así encontramos h1

$$w3h3 = w4h4$$

Interpolar para encontrar h3

$$y = \left(\frac{1190.8 - 1186.36}{340 - 330} \right) * (338 - 330) + 1186.36 = 1189.912 \text{ Btu/lbm}$$

Interpolar para encontrar h2

$$y = \left(\frac{1190.63 - 1193.83}{550 - 540} \right) * (546 - 540) + 1193.83 = 1191.91 \text{ Btu/lbm}$$

Calculando h1

$$h1 = \frac{(11610 * 1189.912) - (4642 * 1191.91)}{6968} = 1188.580956 \text{ Btu/lbm}$$

Interpolar para encontrar t1 con h1

$$y = \left(\frac{560 - 550}{1186.95 - 1190.63} \right) * (1188.58 - 1190.63) + 550 = 555.5706522 \text{ °F}$$

Temperatura de entrada del flujo de agua hacia el calentador No. 2

2.4. cálculos del calentador No. 3

Calculando h6

$$y = \left(\frac{1185.76 - 1183.03}{320 - 310} \right) * (318.64 - 310) + 1183.0 = 1185.38872 \text{ btu/lbm}$$

Calculando h7

$$y = \left(\frac{1088.23 - 1105.47}{670 - 660} \right) * (668 - 660) + 1105.47 = 1091.678 \text{ btu/lbm}$$

Calculando el calor cedido

$$Q_c = w * hQ_a = Q_c$$

$$Q_c = 6968 * (1091.678 - 1188.58) = -675213.136 \text{ btu/h}$$

Calculando t2

$$Q_a = m * cp (\Delta t)$$

$$cp \text{ del agua} = 1.035 \text{ btu/lb}^{\circ}\text{F}$$

Despejando t2

$$t2 = \frac{Q_a}{w * cp} - t1$$

$$t2 = \frac{675213.136}{299376 * 1.035} - 318.64 = 320.8191321$$

$$t2 = 320.8191321 ^{\circ}\text{F}$$

Temperatura de salida del flujo de agua del calentador No. 3 es la que dirige hacia el domo de la caldera en periodo de cogeneración