

Análisis de la generación de vapor en la industria sucroenergética en un ingenio

Fecha de recepción: 29 julio 2024

Fecha de corrección: 20 agosto 2024

Mario Santizo, PhD, MEng¹

RESUMEN

Se presenta en esta investigación, los resultados correspondientes a la investigación práctica realizada en las calderas de bagazo de un Ingenio de azúcar.

Para optimizar el sistema de generación de vapor en un ingenio, es necesario conocer los "elementos" que están relacionados con ella y sus efectos; a continuación, se presentan algunos de estos elementos:

1. Capacidad de los operarios para operarla e interpretar los resultados [Interpretación de la automatización y digitalización]
2. Automatización y control digital de las variables
3. Optimización de la curva de carga
4. Mantenimiento fuera de zafra

Es prioritario que el personal profesional y operarios del Ingenio tengan presente estos factores y su interrelación; aunado a la "veracidad de la información y criterio ingenieril", es la única manera de alcanzar una operación "estable y eficiente" en las calderas de bagazo.

Respecto a numeral 1.

La mayor parte de operarios de las calderas de bagazo del Ingenio son personas con experiencia - indispensable para la operación -. Además de la experiencia requerida es indispensable que los operarios conozcan a cabalidad que significa cada una de las variables de operación que se digitaliza [la optimización de la curva de carga si es conocimiento y responsabilidad directa del

profesional a cargo de las calderas de bagazo: además es la única razón por la cual se automatiza una caldera de combustible agroindustrial].

Se considera preocupante la falta de capacidad para interpretar las variables de operación de las calderas por parte de los operarios; e "indispensable y urgente" que un profesional con experiencia les imparta en el tiempo de no zafra un curso práctico sobre las variables de operación a esperar en cada caldera y medidas correctivas a tomar respecto a la variación que presenten dentro de los límites normales que se especifiquen [cada caldera posee variables específicas de acuerdo a su diseño y operación]. Este curso podría ser de 24 horas.

Respecto a numeral 2.

Respecto a la automatización y control digital de las variables de las calderas, estas mediciones deben ser precisas ya que de ellas depende la operación eficiente de las calderas. Si no se poseen valores precisos se toman determinaciones erróneas o se ignoran los resultados digitales. Se determinó en la evaluación realizada algunas mediciones digitales no eran correctas y al analizar la información correspondiente a dos meses y medio de zafra en las calderas 6, 7, y 8 se observan mediciones digitales que no concuerdan con la operación de una caldera. Se pudo observar que la temperatura a la salida de los gases de combustión de la caldera 9 no era la correcta, tampoco la correspondiente entre la segunda etapa del precalentador y economizador.

¹PhD en Eficiencia Energética, MEng. En Energía Renovable y Eficiencia Energética. Consultor en industrias sucroenergéticas de la caña.

Análisis de la generación de vapor en la industria sucroenergética en un ingenio

Las temperaturas del aire de combustión deben mantenerse a 150°C y durante la evaluación [y zafra], se mantuvo la del quemador 1 en 207°C y la del quemador 2 en 125°C, determinando el ingeniero Sierra que era a causa de un mal diseño en los ductos de aire.

Respecto a numeral 3.

La optimización de la curva de carga es el "único objetivo" de automatizar una caldera de desechos agroindustriales; A partir de esta

premisa se determina la importancia de la calibración de esta curva. Se sugiere optimizar las curvas de carga al inicio de la zafra 2005-2006.

Respecto a numeral 4.

El mantenimiento fuera de zafra es muy importante para alcanzar resultados favorables en la eficiencia de las calderas [pero existe la limitación del diseño].

Palabras clave: Caldera, sistemas de vapor, optimización, Eficiencia térmica, Ingenios.

ABSTRACT

This section presents the results corresponding to the practical article carried out in the bagasse boilers of a sugar mill.

To modify the steam generation system in a mill, it is necessary to know the "elements" that are related to it and their effects; Below are some of these elements:

1. Ability of operators to operate and interpret results
2. Automation and digital control of the variables
3. Optimization of the load curve
4. Maintenance out of harvest

It is a priority that the professional personnel and operators of the mill keep in mind these factors and their interrelation; coupled with the "veracity of the information and engineering criteria", it is the only way to achieve a "stable and efficient" operation in the bagasse boilers.

Respect numeral 1.

The majority of operators of the bagasse boilers of Ingenio are experienced people - indispensable for the operation -. In addition to the required experience, it is essential that operators know a completeness that means each of the operation variables that are digitized the optimization of the load curve if it is the knowledge and direct responsibility of the professional in charge of the bagasse

boilers: in addition it is the only reason why an agroindustrial fuel boiler is automated.

The lack of capacity to interpret the operation variables of the boilers by the operators is considered worrying; and "indispensable and urgent" that an experienced professional imparts a practical course on the variables of operation to be expected in each boiler and corrective measures to be taken regarding the variation they present within the normal limits Specify "each boiler has specific variables according to its design and operation". This course could be 24 hours.

Respect numeral 2.

Regarding the automation and digital control of the boiler variables, these measurements must be precise since they depend on the efficient operation of the boilers. If precise values are not required, erroneous determinations are taken or digital results are ignored. In the evaluation carried out, some digital measurements were not correct and when analyzing the information corresponding to two and a half months of harvest in boilers 6, 7, and 8, digital measurements are observed that do not match the operation of a boiler. It was observed that the temperature at the outlet of the combustion gases of the boiler 9 was not correct, nor the corresponding temperature between the second stage of the preheater and economizer.

Canalización del Conocimiento Científico

Análisis de la generación de vapor en la industria sucroenergética en un ingenio

The combustion air temperatures must be maintained at 150°C and during the and zafra evaluation, the burner 1 at 207°C and the burner 2 at 125°C are maintained, determining the engineer Sierra who was a cause of a bad design in the pipelines of air.

Respect numeral 3.

The optimization of the load curve is the "sole objective" of automating a boiler for agroindustrial waste; From this premise the importance of the calibration of this curve is

determined. Load curves are shown accurately at the beginning of the 2005-2006 harvest.

Respect numeral 4.

Maintenance outside the harvest is very important to achieve favorable results in boiler efficiency, but there is a design limitation limitación.

Keywords: Boiler, Steam systems, optimization, termal efficiency, Sugar mill.

INTRODUCCION

Guatemala es un pequeño país ubicado en la región centroamericana. A nivel mundial, Guatemala todavía es considerada un "país en vías de desarrollo". Uno de los rubros productivos de exportación más importante es la exportación del azúcar de caña.

Esta investigación se realizó en un Ingenio en Guatemala, el cual, por la diversificación del proceso, es un ingenio representativo de la industria en Guatemala, este ingenio procesa 28,000 TM de caña de azúcar por día.

La industria del azúcar es autosuficiente energéticamente, es decir, la energía térmica y eléctrica utilizada en el proceso de producción del azúcar se obtiene de la misma materia prima. Actualmente la industria del azúcar ha tenido un giro muy importante: Productores de energía eléctrica para la venta.

La caña de azúcar que se cultiva en el ingenio es del género de las Gramíneas (Gramineae), especie *Saccharum officinarum*. Se cultiva en zonas calurosas y húmedas. El combustible para las calderas acuotubulares es el bagazo, que se obtiene después de que la caña picada pasa al tándem de molienda, saliendo el bagazo con el 50% de fibra leñosa. El bagazo

seco constituye el 14% de la caña (28% base húmeda) y se obtiene con un promedio de 3% grados Brix, el cual no debe ser superior,

de lo contrario el proceso de extracción del azúcar, disminuye su productividad.

En la década de los años 80's, el bagazo se utilizaba únicamente para cogenerar (Utilización de la combustión del bagazo para producción de energía eléctrica para el proceso y utilización de la energía térmica como vapor después de las turbinas de contrapresión-extracción.

Debido a aspectos sociopolíticos a nivel mundial, tuvo repercusión en Guatemala en la década de los 90's., convirtiéndose los ingenios de azúcar en productores de energía eléctrica y de alcohol carburante.

Como consecuencia debido a este giro del negocio, los ingenios en los últimos tres años han incrementado la capacidad de producción, ante todo los ingenios más grandes, que son: Ingenio Magdalena, Ingenio Pantaleón, Ingenio Santa Ana, e ingenio La Unión. Le energía que se utiliza para producir energía eléctrica y alcohol carburante es la térmica y eléctrica. Esta investigación está enfocada en la generación de vapor como fuente de energía térmica en los procesos mencionados.

Análisis de la generación de vapor en la industria sucroenergética en un ingenio

Análisis de las calderas

Eficiencia de caldera 9.

La eficiencia de la caldera 9, calculada de acuerdo a (Santizo, 2008), tomando en cuenta el rendimiento el cual se digitaliza en el panel de control, es de 80%, la eficiencia obtenida a través del inventario físico del búnker es del 76% y según el manual de funcionamiento elaborado por CALDEMA, debe ser del 87%; lo que indica que la eficiencia correcta se determinaría en tiempo de zafra al comparar la eficiencia de caldera utilizando el rendimiento digitalizado con la eficiencia de caldera utilizando el inventario físico del búnker. O sea que la eficiencia debería estar entre el 80% y 76% dependiendo de los resultados obtenidos al inicio de zafra.

Por experiencia, casi se podría predecir que una eficiencia del 87% según CALDEMA, es poco probable, ante todo debido a que la eficiencia por el método del rendimiento [80%] se determinó manteniendo una temperatura de los gases de combustión de 152°C, o sea una recuperación calor excesiva en los gases de combustión.

Al respecto se sugiere elevar esta temperatura hasta 185°C o 190°C, pues el punto de rocío del búnker es aproximadamente de 165% [variando el punto de rocío levemente de acuerdo con el porcentaje de azufre del búnker].

Por el método del exceso de oxígeno no se determinó ya que existe en esta caldera, discrepancia excesiva en los análisis realizados el 17 y 18 de julio entre el transmisor de la caldera [6.7%] y las mediciones con el equipo marca Testo [10.5%].

Eficiencia de calderas 4, 5, 6, 7 y 8.

Para el análisis de las eficiencias de las calderas 4, 5, 6, 7, y 8 se utilizó la información del sistema gráfico digital correspondiente a tres meses de zafra [diciembre, principios de enero, marzo, abril y mayo]. La fórmula que utiliza PROENERGIA,

es la misma que utiliza CALDEMA, a través del rendimiento.

Eficiencias de caldera del 1 mayo al 1 marzo del 2005¹

Caldera	Eficiencia ²
4	57 %
5	54 %
6	51 %
7	61 %
8	63 %

En la discusión realizada en las instalaciones del Ingenio, informó el Ingeniero Sierra que la eficiencia en la caldera 5 era debido a problemas de intercambio de calor en el precalentador y que no era de extrañar este valor. En el caso de la caldera 4, por su diseño, se considera aceptable la eficiencia. La caldera 6 debe realizarse un buen mantenimiento en el tiempo de paro ya que su eficiencia es muy baja y optimizarla a través de la curva de carga estando funcionando correctamente el transmisor de oxígeno. La caldera 7 y 8 están dentro de valores de eficiencia aceptables (del 60% al 65%).

La eficiencia de las calderas 4 a 8 se determinaron de acuerdo con la fórmula que se formuló para el Ingenio, la cual está en función del vapor producido y el bagazo alimentado. Esta eficiencia depende de la exactitud del medidor de vapor el cual es bastante preciso y de la distribución del bagazo alimentado a cada caldera, el cual se determinó de acuerdo con la capacidad instalada de cada una de las calderas, esta aproximación se hizo debido a que la capacidad de las calderas y el vapor medido coincidían en porcentaje de acuerdo con un error calculado el cual se indica a continuación. Si el vapor producido por cada caldera no hubiera sido aproximadamente igual a la potencia instalada de cada una de

¹ De datos experimentales

² Ver apéndice.

Análisis de la generación de vapor en la industria sucroenergética en un ingenio

las calderas, no se hubiera podido hacer esta aproximación. (Ver estudio de energía). A continuación, se especifica el error máximo que se incurre al utilizar esta fórmula; que por cierto la fórmula que se utiliza es la misma que utilizó CALDEMA en la caldera 9. Si el bagazo se pesara en las calderas, prácticamente no existiría error en el cálculo de la eficiencia de caldera.

Si se utiliza el porcentaje de exceso de oxígeno para determinar la eficiencia de caldera, los errores serían excesivos ya que existen problemas de exactitud en los transmisores de O₂.

Error máximo al utilizar la relación vapor/bagazo para el cálculo de la eficiencia de caldera³

Caldera	% de error	Ejemplo	Rango
4	2.44	60 %	58.54 a 61.46
5	2.45	60 %	58.53 a 61.47
6	4.73	60 %	57.16 a 62.84
7	8.38	60 %	54.97 a 65.03
8	1.78	60 %	58.93 a 61.07

Avances en la ejecución de los proyectos identificados en el estudio de energía

De acuerdo visita a Ingenio y a reunión del 1 de julio, a la fecha no se han iniciado ninguna acción al respecto; únicamente el Departamento de Cogeneración que a través de la Empresa Maquinsa están elaborando un listado de los modelos de las trampas para solicitar accesorios que puedan ser sustituidos en las trampas de cubeta invertida; son aproximadamente 17 trampas de cubeta invertida.

Proyectos por realizar en tiempo de no zafra:

1. Verificar las trampas de vapor en fábrica.
2. Presurizar tanque de condensado de caldera 4 (verificar estructura tanque).
3. Instalar trampas de vapor en calentadores de jugo líquido-vapor.
4. Sellar fugas de vapor de acuerdo con fotografías tomadas durante la zafra. (ver estudio)
5. Aislar tubería de vapor de acuerdo con fotografías tomadas en tiempo de zafra. (ver estudio)

Proyectos por realizar en tiempo de zafra:

6. Optimizar curva de carga de calderas automatizadas. (ver estudio)

Automatización de caldera 10

De acuerdo con listado presentado por el Ingeniero Pedro Pablo Leal, la automatización es la adecuada, en reunión del 1 de julio se estableció que se colocarían las dos balanzas de pesaje en caldera 10. De esta manera puede monitorearse el rendimiento, igual que en la caldera 9 y determinar la eficiencia de caldera de manera confiable.

Situación de la industria sucroenergética de la caña de azúcar

Antes de entrar a la situación energética de la industria sucroenergética de la caña de azúcar, se considera importante a nivel de productores o autoprodutores de energía, visualizar la demanda nacional por combustible. Se considera en la tabla 1 la demanda por hidroeléctricas, combustóleos y el sector cañero – Bagazo de caña -.

³ De cálculos según (Santizo, 2008)

Análisis de la generación de vapor en la industria sucroenergética en un ingenio

Tabla 1

Demanda eléctrica de Autoprodutores - 2,010 -			
Combustible	GWh	Porcentaje	
Hidroenergía	27.4	4.52	
Fuel Oil	213.1	35.14	
Bagazo de Caña	366	60.35	
Total	606.5	100.00	

Fuente: MEM (Ministerio de Energía y Minas de Guatemala)

Debido a aspectos sociopolíticos a nivel mundial, tuvo repercusión en Guatemala en la década de los 90's. En la industria del azúcar, los ingenios cambiaron de giro el negocio, convirtiéndose en productores de

energía eléctrica y de alcohol carburante y alcohol ENA para exportación.

La generación eléctrica en ingenios es de 370 MW que equivale al 16.07 % de la generación total, corresponde el 16% a los ingenios de azúcar - Tabla 2 -,

Tabla 2

Generación Eléctrica Nacional 2009		
	MW	%
Hidroeléctricas	790	34.31
Geotérmicas	44	1.91
Motores C. I.	703	30.52
Plantas de Vapor	180	7.82
Ingenios	370	16.07
Turbinas de Gas	216	9.38
Total	2,303	100.00

Fuente: MEM (Ministerio de Energía y Minas de Guatemala)

Las fábricas de alcohol que se han instalado en los ingenios utilizan como materia prima, la melaza, que es un subproducto de los ingenios y la producción anual es de 53.88 Mega Galones anuales - Tabla 3 -.

Tabla 3

Generación de alcohol en ingenios 2009⁴

Destilería	Capacidad actual [Mgalones año] 2008	Proyección [Mgalones] 2009

⁴ De bitácora Ingenio

Análisis de la generación de vapor en la industria sucroenergética en un ingenio

Destilería 1	15.85	31.70
Destilería 2	5.81	11.62
Destilería 3	5.28	10.56
Total	26.94	53.88

El equipo que usualmente se ha instalado en lo que es generadores de vapor, son marca Caldema (tecnología brasileña) y generadores de vapor usados, comprados en los Estados Unidos de América; respecto al turbogenerador, se han instalado de varias marcas, siendo la común los General electric y otras marcas americanas.

La producción de energía eléctrica y alcohol requiere de energía térmica, es decir generación de vapor. Para los ingenios es económico generar vapor utilizando como combustible el bagazo de caña, ya que es un subproducto de estos, obviamente este bagazo hay que utilizarlo eficientemente para que la energía correspondiente a este agrocombustible sea suficiente.

Como consecuencia de este escenario técnico, los ingenios han procedido a eficientar sus generadores de vapor ya sea correspondientes a los ciclos Rankine como a los ciclos de cogeneración, a través de la automatización y ajuste de las variables a valores eficientes.

Resumiendo, la conversión en el negocio que han tenido los ingenios debido a los precios de los combustibles y energía eléctrica, se resumen en tres rubros:

1. Generación de energía eléctrica para la venta.
2. Producción de alcohol carburante.
3. Incremento den la potencia instalada en los principales ingenios.

Esta diversificación que han tenido los ingenios de azúcar convierte a este negocio

en Industria "Sucroenergética de la caña de Azúcar" – SCA -.

Esta diversificación en los ingenios se observa en la tabla 4:

Tabla 4

Diversificación del giro en el negocio en los ingenios de azúcar
Generación de energía eléctrica para la venta y producción de alcohol carburante⁵

Rubro	Capacidad
Energía eléctrica para la venta	370 MW
Producción de alcohol	53.88 Mgal. /año

Fuente: MEM (Ministerio de Energía y Minas de Guatemala)

De acuerdo con la diversificación de los ingenios, se consideró importante enfocar esta investigación al diagnóstico energético en los generadores de vapor de un ingenio en Guatemala.

Descripción de la investigación

Desde el punto de vista de la energía, en el proceso sucroenergético es importante tomar en cuenta lo siguiente:

1. La eficiente extracción del jugo que permite una extracción óptima del jugo y a la vez características deseadas en el

⁵ De bitácora Ingenio

Análisis de la generación de vapor en la industria sucroenergética en un ingenio

bagazo de la caña, es decir grados brix y contenido de humedad.

2. Utilización eficiente del bagazo, como combustible, en las calderas de vapor – calderas acuotubulares -.

La investigación se enfoca en la utilización eficiente del bagazo en las calderas de vapor en los sistemas Rankine y de cogeneración, identificando posibilidades de ahorro energético a través de una mayor eficiencia en los generadores de vapor.

Para realizar este estudio se monitorearon las calderas acuotubulares correspondiente a un ciclo Rankine y a las de cogeneración, durante un mes.

Según (El-Wakil, 2002), se analiza la relación aire-combustible, que es un parámetro determinante en la eficiencia de combustión, debido a que usualmente las calderas operan con exceso de aire superior al mínimo permisible⁶. Esta relación se puede mantener en calderas automatizadas⁷ debido a la versatilidad en la regulación combustible-aire.

Para la realización de esta investigación, se utilizó el siguiente equipo de medición:

1. Analizador de gases de combustión – medición de CO₂, O₂ -
2. Anemómetro – Medición de velocidad en entrada aire en ventiladores de tiro forzado -
3. Velómetro – Medición de velocidad en ductos de aire -

⁶ Exceso mínimo permisible de aire se define como el aire mínimo requerido para llevar a cabo la combustión completa, este exceso de aire es mayor al estequiométrico o teórico (Cengel, Turner, & Cimbala, 2008).

⁷ Regulan la alimentación del bagazo de caña de acuerdo con la presión del domo superior y/o manifold de distribución, controlando el tiro forzado, de acuerdo con la alimentación del bagazo. De acuerdo con la presión del hogar se regula el tiro inducido, el cual posee regulación de flujo de aire a través de variación en el dâmpner y velocidad variable en los ventiladores.

4. Medidor de humedad – Del aire ambiente -

Además, la información correspondiente al panel de control de las calderas de vapor, como es la presión de vapor, presión del hogar, temperatura del vapor, etc.

Análisis de la generación de vapor en la industria sucroenergética del ingenio

De acuerdo con las evaluaciones efectuadas en el Ingenio, historial de un mes de operación de las calderas de bagazo (bitâcora y sistema gráfico) y de acuerdo con información obtenida durante el tiempo de zafra, consultas y trabajo de escritorio; del 20 noviembre al 25 diciembre del 2010, se concluyeron los siguientes aspectos técnicos que se consideran importantes e identifican claramente las mejoras que deben realizarse para una operación “segura” y eficiente.

CALDERA 9

Eficiencia de caldera

De acuerdo con lecturas se evaluó la eficiencia de la caldera, se pudo observar que la eficiencia de la caldera se digitalizaba en la pantalla correspondiente; como rendimiento (kg de vapor/kg de combustible), este rendimiento multiplicándose por el factor 6.2606⁸, nos da la eficiencia de caldera⁹.

Eficiencia de caldera 9 tomando como referencia el rendimiento térmico que digitaliza el panel de control de la caldera 9:

De acuerdo con el monitoreo de dos días se obtiene la siguiente eficiencia de caldera promedio en la tabla N.º 5:

⁸ Factor basado en los contenidos entálpicos del agua alimentada a la caldera, vapor producido y capacidad calorífica del búnker. (Chandra, 2005).

⁹ Definida como la energía que se aprovecha para producir vapor (se toma en cuenta la energía aprovechada por el precalentador y el economizador).

Canalización del Conocimiento Científico

Análisis de la generación de vapor en la industria sucroenergética en un ingenio

TABLA 5

Evaluación del 17 y 18 de junio del 2005	
Eficiencia máxima	84 %

Eficiencia mínima	76 %
Eficiencia promedio	80 %
Ef. Máxima – Ef. Mínima	8 %

1. Eficiencia de caldera 9 de acuerdo con el manual de funcionamiento de CALDEMA:

De acuerdo con tabla de funcionamiento de CALDEMA¹⁰, las eficiencias esperadas se presentan en la tabla N° 6:

TABLA 6¹¹

Carga (100%) 165,347 lb/h	E. caldera	Kg/kg ¹²	Carga (90%) 148,000 lb/h	E. caldera	Kg/kg	Carga (80%) 165,347 lb/h	E. caldera	Kg/kg
Bagazo	67.4	2.38		68.00	2.40		68.3	2.41
Carbón	83.00	8.52		83.00	8.52		83.00	8.52
Búnker	86.00	14.27		86.00	14.35		87.00	14.37

De acuerdo con la tabla de funcionamiento de CALDEMA se puede observar que la eficiencia de caldera es independiente del porcentaje de carga; pero en cualquier caldera abajo del 60 de porcentaje de carga la eficiencia de caldera disminuye¹³. Se puede establecer que según CALDEMA la caldera 9 operando con búnker es de esperarse una eficiencia de caldera entre 86 y 87%.

Eficiencia de caldera 9 de acuerdo con el inventario físico de búnker alimentado a la caldera y del vapor producido:

De acuerdo con el inventario físico de los tanques 1 y 2 de búnker se obtiene la tabla N° 7:

Tabla 7

Fecha	Flujo vapor ¹⁴ (lb/día)	Flujo vapor (lb/h)	Carga (%)	Combustible ¹⁵ (gal/día) ¹⁶	E. ¹⁷ caldera
16 junio 2005	2,685,400	111,892	67.67	26,912	75.36
15 junio 2005	2,621,600	109,233	66.06	27,676	71.54
14 junio 2005	2,899,200	120,800	73.06	27,684	79.09

¹⁰ Se adjunta en Apéndice.

¹¹ De acuerdo a datos tomados experimentalmente.

¹² Kg de vapor/kg de combustible.

¹³ En el caso, sus calderas operan arriba del 60% de la carga. ¹⁴ 165,347 lb vapor/h de capacidad caldera 9 a plena carga.

¹⁵ Densidad del búnker a 80°C es de 8.30 lb/gal

¹⁶ Poder calorífico del búnker es de 150,000 Btu/gal

¹⁷ Eficiencia de caldera = (lb vapor/gal búnker)0.7552)

Análisis de la generación de vapor en la industria sucroenergética en un ingenio

11 junio 2005	2,899,400	120,808	73.06	29,246	74.87
10 junio 2005	2,960,000	123,333	74.59	29,118	76.77
Promedio					75.53
Mínimo					71.54
Máximo					79.09

Resumen de opciones analizadas:

En tabla N° 7 se presentan los resultados correspondientes a las tres fuentes de información para la determinación de la eficiencia de la caldera 9:

Tabla 8

Método	Eficiencia de caldera (%)
De acuerdo con rendimiento térmico digitalizado	80
De acuerdo con manual de funcionamiento de CALDEMA	86
De acuerdo con inventario físico	76

De acuerdo con el rendimiento térmico digitalizado en el panel de control de la caldera 9, la eficiencia de caldera durante los días 17 y 18 de junio fue de 80%, de acuerdo con manual de funcionamiento de CALDEMA debe ser del orden del 87% y de acuerdo con el inventario físico en tanques de bunker es de 76%.

A pesar de que la prueba correspondiente al inventario físico se realizó durante cinco días y el resultado correspondiente [76%] puede ser lógico; de acuerdo con las condiciones de operación de la caldera [muy baja temperatura en los gases de combustión a la salida de la chimenea], se considera exacta la eficiencia de caldera proporcionada a través de la digitalización [80%]. Respecto a la eficiencia del manual de CALDEMA, se considera un 87% una eficiencia muy alta.

Se debe considerar como aceptable el método utilizando el rendimiento digitalizado en el panel de control de la caldera 9:

$$\text{Eficiencia caldera} = \left(\frac{\text{kg vapor}}{\text{kg bunker}} \right) (6.2606)$$

II. Control de variables

Los controles de temperatura, presión y oxígeno se mantienen en mal estado por períodos de tiempo largos. En esta sección se presentan la diferencia en lecturas que pudieron comprobarse ya que estas se requieren para comprobar cálculos relacionados con el rendimiento y eficiencia de la caldera 9.

1. Temperatura después del precalentador (antes del filtro de gases)

Durante los días 17 y 18 de junio la temperatura indicada se mantuvo del orden de 152°C, verificando la bitácora de meses anteriores se observa que esta sube por momentos a 170°C (cuando la caldera opera a régimen de carga elevada). La temperatura correspondiente al punto de rocío de los gases de chimenea es del orden de 165°C, variando levemente de acuerdo con el porcentaje de azufre del búnker.

La temperatura "tan baja" en los gases de chimenea antes del filtro de gases ocasiona

Canalización del Conocimiento Científico

Análisis de la generación de vapor en la industria sucroenergética en un ingenio

una gran condensación ácida que inicia un proceso de oxidación relativamente rápido en la chimenea y superficies de intercambio de calor (economizador y precalentador); el azufre contenido en el búnker (que es del orden del 2 a 3.5%) reacciona con el condensado del vapor de agua produciéndose ácido sulfhídrico el cual es un contaminante muy corrosivo.

Al observar esta temperatura se lo comuniqué al Ingeniero Sierra y al consultor brasileño ya que debían tomar acciones al respecto. En ese momento se baypaseo el agua de alimentación de la caldera para que este no absorbiera energía de los gases y así elevara la temperatura. La temperatura prácticamente no varió, ya que esta acción también debe estar relacionadas con otras variables (velocidad de aire, aire de calentamiento, área de transferencia de calor de los intercambiadores, porcentaje de oxígeno, etc.).

En los parámetros de la caldera de acuerdo con información de CALDEMA, la temperatura debe mantenerse entre 170°C y 180°C, pero no se toma en cuenta. (el consultor brasileño ignoraba este parámetro).

Considero que debe tenerse mucho cuidado con muchos otros parámetros que pueden ocasionar otro tipo de problemas; básicamente relacionados con la eficiencia de las calderas. En este caso se considera que la temperatura mínima que debe mantenerse en ese punto es de 185°C a 190°C, para que exista un margen de seguridad ya que una caldera fluctúa su operación dependiendo de los requerimientos de vapor. Se sugiere una limpieza y chequeo de los tubos de intercambio de calor.

Al mantener la temperatura del orden de 185°C a 190°C, la eficiencia de la caldera disminuirá posiblemente de un 80% a un 78%¹⁸.

2. Temperatura salida de gases de combustión (antes de economizador)

¹⁸ Ver inciso 5; conclusión, final del segundo párrafo.

Durante el 17 de junio se mantuvo la temperatura indicada en 280°C, esta es una temperatura baja por ser a la salida de la caldera por lo que se midió con el registrador de temperatura portátil que disponga para estos fines, midiendo este registrador 303°C en este punto.

Se procedió a cambiar la termocupla por parte del Ingenio, observándose que esta tenía 6 pulgadas de inserción; se instaló una termocupla tipo J de 18 pulgadas de inserción (se recomienda si es posible en los ductos (fase gaseosa) instalar termocuplas con 18 o 24 pulgadas de inserción).

3. Temperatura de gases a la entrada del precalentador

La temperatura de gases entre el precalentador y la primera etapa del economizador (205°C) era menor que la temperatura antes de la segunda etapa del precalentador; lo cual era totalmente imposible (o sea que, al calentarse el agua, también los gases de combustión se calentaban). La temperatura entre el precalentador y la primera etapa del economizador se determinó con el registrador proporcionando una temperatura de 265°C, (esta si es una temperatura mayor que la correspondiente a la segunda etapa del precalentador). Quedó solucionado instalando el Ingenio, una termocupla de 18 pulgadas de inserción.

4. Temperatura de aire de combustión

Se observó que la temperatura del aire de combustión de uno de los quemadores era del orden de 207°C y la del otro quemador era de 125°C, y las termocuplas estaban registrando bien las temperaturas, por lo cual le comuniqué al Ingeniero Sierra que no era lógico y que la temperatura según CALDEMA debía ser de 150°C para ambos quemadores.

El 1 de julio que discutimos en las instalaciones del Ingenio, los resultados, indicó el Ingeniero Sierra que el problema era de diseño, ya que, debido a la distribución de los ductos de aire para cada quemador, en uno ingresaba aire más frío. Actualmente el

Análisis de la generación de vapor en la industria sucroenergética en un ingenio

Ingenio está trabajando en el rediseño de los ductos o ducto.

5. Oxígeno de gases de combustión

Se monitorearon los gases de combustión, analizando el contenido de oxígeno a partir del analizador portátil del Ingenio (Testo) y el analizador de la caldera (transmisor), obteniéndose los resultados en la tabla N.º 9:

Tabla 9

Mediciones de temperatura realizadas con el medidor portátil marca Testo y comparadas con el transmisor de la caldera 9

Transmisor	Testo	Transmisor	Testo
6.9	10.9	6.7	10.7
7.0	11.0	6.6	10.5
7.0	11.0	6.7	10.5
6.8	10.8	6.7	10.5
6.7	10.7	6.5	10.2
6.6	10.6	6.5	10.2
6.5	10.5	6.6	10.3
6.6	10.6	6.7	10.4
6.6	10.6	6.7	10.4

Debido a la digitalización del rendimiento en la caldera 9: kg vapor/kg búnker; el contenido de oxígeno no afecta la determinación de la eficiencia de caldera.

Lo que debe tomarse en cuenta en este caso es que varias variables de operación en las calderas, su determinación no es exacta y esto puede causar la toma de decisiones incorrectas al tomarlas en cuenta.

CALDERAS 4 a 8

Eficiencia de calderas

La eficiencia de las calderas 4 a 8 se determinaron de acuerdo con la fórmula que se formuló para el Ingenio, la cual está en función del vapor producido y el bagazo alimentado. Esta eficiencia depende de la exactitud del medidor de vapor el cual es bastante preciso y de la distribución del bagazo alimentado a cada caldera, el cual se determinó de acuerdo con la capacidad

instalada de cada una de las calderas, esta asunción se hizo debido a que la capacidad de las calderas y el vapor medido coincidían en porcentaje de acuerdo con un error calculado el cual se indica en la tabla N.º 6. Si el vapor producido por cada caldera no hubiera sido aproximadamente igual a la potencia instalada de cada una de las calderas, no se hubiera podido hacer esta aproximación. (ver estudio de energía). A continuación, se especifica el error máximo que se incurre al utilizar esta fórmula; que por cierto la fórmula que utiliza PROENERGIA es la misma que utilizó CALDEMA en la caldera 9. Si el bagazo se pesara en las calderas, prácticamente no existiría error en el cálculo de la eficiencia de caldera.

Si se utiliza el porcentaje de exceso de oxígeno para determinar la eficiencia de caldera, los errores serían excesivos ya que existen problemas de exactitud en los transmisores de O₂.

Canalización del Conocimiento Científico

Análisis de la generación de vapor en la industria sucroenergética en un ingenio

Tabla 10

Error máximo al utilizar la relación vapor/bagazo para el calculo de la eficiencia de caldera

Caldera	% de error	Ejemplo	Rango
4	2.44	60 %	58.54 a 61.46
5	2.45	60 %	58.53 a 61.47
6	4.73	60 %	57.16 a 62.84
7	8.38	60 %	54.97 a 65.03
8	1.78	60 %	58.93 a 61.07

Los promedios de las eficiencias de caldera del 1 de mayo al 1 de marzo del 2005 utilizando la formula indicada, se expresa en la tabla N.º 11.:

Tabla 11

Eficiencias de caldera del 1 mayo al 1 marzo del 2005

Caldera	Eficiencia ¹⁹
4	57 %
5	54 %
6	51 %
7	61 %
8	63 %

En la discusión realizada en las instalaciones del Ingenio, informó el Ingeniero Sierra que la eficiencia en la caldera 5 era debido a problemas de intercambio de calor en el precalentador y que no era extraño este valor. En el caso de la caldera 4, por su diseño, se considera buena su eficiencia. La caldera 6 merece un buen mantenimiento en el tiempo de paro ya que su eficiencia es muy baja. La caldera 7 y 8 están dentro de valores de eficiencia aceptables (del 60% al 65%).

II. Resumen control de variables

En el sistema gráfico de monitoreo correspondiente a tres meses de zafra [diciembre, principios de enero, marzo, abril y mayo] se observa que las variables [temperatura, medición de O₂, producción de vapor] presentan mucha discrepancia en sus

valores, lo que en determinado momento dificulta la optimización de estas en su operación, se observan algunos valores correspondientes al sistema de monitoreo gráfico de las calderas de bagazo; como los siguientes:

Caldera 6.

1. Temperatura antes del economizador: del 8 de diciembre al 4 de enero del 2005, se observó una temperatura del orden de 630°C, del 5 de enero al 11 de abril del 2005 de 260°C y del 13 de abril al 22 de mayo del 2005 de 30°C.
2. Temperatura después del economizador: del 8 de diciembre al 4 de enero del 2005 se observó una temperatura de 9°C, del 5 al 8 de enero de 98°C, del 1 de marzo al 16 de abril de 342°C y del 17 de abril al 22 de mayo de 0°C.
3. Temperatura del aire antes del precalentador: del 8 de diciembre al 4 de enero de 10°C, del 1 de marzo al 16 de abril de 320°C y del 17 de abril al 22 de mayo de 0°C.
4. Temperatura del aire después del precalentador: del 8 de diciembre al 8 de enero se observó una temperatura de 33°C, del 1 de marzo al 13 de mayo de 270°C y del 15 al 22 de mayo de 170°C.
5. Producción de vapor: Del 8 de diciembre al 4 de enero de 25, del 5 enero al 8 de enero de 610 y del a de marzo al 8 de mayo de 2,500.
6. Temperatura del vapor a la salida de la caldera: Del 8 de diciembre al 4 de enero de 18°C, del 5 de enero al 13 de mayo de

¹⁹ Ver apéndice.

Análisis de la generación de vapor en la industria sucroenergética en un ingenio

600°C y del 14 de mayo al 22 de mayo de 300°C.

7. Temperatura del hogar de la caldera: Del 8 de diciembre al 4 de enero de 0°C, del 5 de enero al 8 de enero de 6°C, del 1 de marzo al 13 mayo de 1,400°C.

Caldera 7.

1. Temperatura del agua antes del economizador: Del 8 diciembre al 4 de enero 10°C, del 5 de enero hasta finalizar zafra 300°C.
2. Temperatura del agua después del economizador: Del 8 diciembre al 4 enero de 400°C, del 5 al 8 de enero de 95°C del 1 marzo en adelante de 350°C.
3. Temperatura del aire después del precalentador: Del 8 diciembre al 4 enero de 300°C, del 6 al 8 enero de 1,650°C, del 1 marzo en adelante 222°C.
4. Exceso de oxígeno: Del 8 diciembre al 8 enero de 2,290 %

Caldera 8.

1. Del 8 de diciembre al 4 de enero todas las variables cero.
2. Exceso de oxígeno: Del 5 al 8 enero 648 %, del 1 marzo en adelante del 17 % al 3 %.

AUTOMATIZACION CALDERA 10

De acuerdo con listado presentado por el Ingeniero Pedro Pablo Leal²⁰, la automatización es la adecuada, en reunión del 1 de julio se estableció que se colocarían las dos balanzas de pesaje en caldera 10. De esta manera puede monitorearse el rendimiento, igual que en la caldera 9 y determinar la eficiencia de caldera de manera confiable.

CONCLUSIONES

1. De acuerdo con el rendimiento térmico digitalizado en el panel de control de la caldera 9, la eficiencia de caldera durante los días 17 y 18 de junio fue de 80%, de

acuerdo con manual de funcionamiento de CALDEMA debe ser del orden del 87% y de acuerdo con el inventario físico en tanques de bunker es de 76%. A pesar de que la prueba correspondiente al inventario físico se realizó durante cinco días y el resultado correspondiente [76%] puede ser lógico; de acuerdo con las condiciones de operación de la caldera [muy baja temperatura en los gases de combustión a la salida de la chimenea], se considera exacta la eficiencia de caldera proporcionada a través de la digitalización [80%]. Respecto a la eficiencia del manual de CALDEMA, se considera un 87% una eficiencia muy alta. Se debe considerar como aceptable el método utilizando el rendimiento digitalizado en el panel de control de la caldera 9: (Faires & Simmang, 2003)

$$\begin{array}{l} \text{Eficiencia caldera} \\ = \left(\frac{\text{kg vapor}}{\text{kg bunker}} \right) (6.2606) \end{array}$$

2. La eficiencia de las calderas 4 a 8 se determinaron de acuerdo con la fórmula que se formuló para el Ingenio, la cual está en función del vapor producido y el bagazo alimentado. Esta eficiencia depende de la exactitud del medidor de vapor el cual es bastante preciso y de la distribución del bagazo alimentado a cada caldera, el cual se determinó de acuerdo con la capacidad instalada de cada una de las calderas, esta asumición se hizo debido a que la capacidad de las calderas y el vapor medido coincidían en porcentaje de acuerdo con un error calculado el cual se indica en la tabla que sigue. Si el vapor producido por cada caldera no hubiera sido aproximadamente igual a la potencia instalada de cada una de las calderas, no se hubiera podido hacer esta aproximación. (ver estudio de energía). A continuación, se especifica el error máximo que se incurre al utilizar esta fórmula; que por cierto la fórmula que se utiliza es la misma que utilizo CALDEMA en la caldera 9. Si el

²⁰ Se adjunta en apéndice

Análisis de la generación de vapor en la industria sucroenergética en un ingenio

bagazo se pesara en las calderas, prácticamente no existiría error en el cálculo de la eficiencia de caldera. Si se utiliza el porcentaje de exceso de oxígeno para determinar la eficiencia de caldera, los errores serían excesivos ya que existen problemas de exactitud en los transmisores de O₂.

Error máximo al utilizar la relación vapor/bagazo para el cálculo de la eficiencia de caldera

Caldera	% de error	Ejemplo	Rango
4	2.44	60 %	58.54 a 61.46
5	2.45	60 %	58.53 a 61.47
6	4.73	60 %	57.16 a 62.84
7	8.38	60 %	54.97 a 65.03
8	1.78	60 %	58.93 a 61.07

Los promedios de las eficiencias de caldera del 1 de mayo al 1 de marzo del 2005 utilizando la fórmula indicada, se expresa en la tabla N.º 7.:

Eficiencias de caldera del 1 mayo al 1 marzo del 2005

Caldera	Eficiencia
4	57 %
5	54 %
6	51 %
7	61 %
8	63 %

En la discusión realizada en las instalaciones del Ingenio, informó el Ingeniero Sierra que la

eficiencia en la caldera 5 era debido a problemas de intercambio de calor en el precalentador y que no era extraño este valor. En el caso de la caldera 4, por su diseño, se considera buena su eficiencia. La caldera 6 merece un buen mantenimiento en el tiempo de paro ya que su eficiencia es muy baja. La caldera 7 y 8 están dentro de valores de eficiencia aceptables (del 60% al 65%).

3. Es indispensable instalar termocuplas tipo J de 18 a 24 pulgadas de inserción en ductos grandes de las calderas para evitar temperaturas falsas.
4. Es muy importante e indispensable que al inicio de la zafra todos los equipos de medición se calibren.
5. Media vez se inicie la zafra con equipos bien calibrados, la lectura dudosa que se presente durante la zafra es responsabilidad de los operarios de los equipos de informar a quien corresponda.
6. Es indispensable que los ingenieros impartan un curso sobre el significado de cada una de las variables en las calderas, pues, aunque sean excelentes operarios, es una limitación muy grande no interpretar los resultados, ni siquiera identificar cuando los controles no están monitoreando datos exactos o cercanos a un comportamiento lógico.
7. Se considera importante que el Departamento de automatización presente un reporte mensual incluyendo todas las variables y la variación de las variables monitoreadas en las calderas.
8. Incluir en el informe de producción las horas trabajadas por caldera.
9. El departamento de calderas debe elaborar un informe mensual sobre la operación de cada una de las calderas y presentarlo a la Gerencia de Operaciones y discutirlos.

Canalización del Conocimiento Científico

Análisis de la generación de vapor en la industria sucroenergética en un ingenio

Bibliografía

- Burghardt, D. (1982). *Engineering Thermodynamics with Applications* (2 nd Edition ed.). Philadelphia: Harper & Row Publisher.
- Cengel, Y., Turner, R., & Cimbala, J. (2008). *Fundamentals of Thermal Fluid Sciences*. New York: Mc Graw Hill.
- Chandra, R. (2005). *Carbon Dioxide Capture from Coal-Fired Power Plants: A Real Options Analysis*. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology.
- El-Wakil, M. (2002). *Powerplant Technology*. New York: College Custom Series.
- Faires, V., & Simmang, C. (2003). *Termodinámica*. México: Noriega Editores.
- Fundamentals of Engineering Thermodynamics*. (1996). United States of America: John Wiley.
- Hoffman, E. (1996). *Power Cycles and Energy Efficiency*. New York: Editorial Academic Press.
- Kanoglu, M., Cengel, Y., & Cimbala, J. (2019). *Fundamentals and Applications of Renewable Energy* (1a ed.). New York: Mc Graw Hill.
- Kyle, B. (1999). *Chemical and Process Thermodynamics* (Third Edition ed.). New Jersey: Prentice Hall.
- Rajput, E. (2013). *Power Plant Engineering* (Fourth Edition ed.). New Delhi: Laxmi Publications.
- Sandler, S. (1997). *Chemical and Engineering Thermodynamics* (Third Edition ed.). New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Santizo, M. (2008). *Balance de Materia y Energía*. Guatemala: Centroamericana.