

# Análisis de variables de operación y desempeño energético en una caldera pirotubular de una fábrica de alimentos enlatados

Mario Santizo Calderón<sup>1</sup>

## RESUMEN

En el presente estudio se realizó la evaluación operacional de un sistema de

generación de vapor perteneciente a una fábrica de alimentos enlatados, con el propósito de determinar el comportamiento de las principales variables que afectan la eficiencia térmica de la caldera y el costo de producción de vapor. Para ello, se efectuó un monitoreo sistemático durante un período de 14 días, registrándose datos ocho veces por día. Posteriormente, la información obtenida fue procesada mediante análisis estadísticos y gráficos de control, con el fin de identificar tendencias operativas, estabilidad del sistema y condiciones de desempeño energético.

La planta cuenta con una caldera pirotubular de 750 BHP, con capacidad de producción de 21,450 lb/h de vapor saturado a 125 PSIA. El combustible utilizado es bunker C, con poder calorífico de 150,000 BTU/galón y un costo promedio de 2.00 USD/galón. El agua de alimentación ingresa a la caldera a 140°F, mientras que la purga representa el 1.80% en peso del vapor generado.

Asimismo, aproximadamente el 3% del vapor producido se pierde durante la distribución debido a fugas y requerimientos de mantenimiento.

El sistema de retorno de condensados presenta pérdidas térmicas importantes, debido a que la tubería no posee aislamiento y el tanque de retorno es abierto, además de encontrarse a una distancia considerable de los puntos de consumo por condiciones topográficas de la planta. Como consecuencia, el agua de reposición y la purga retornan al tanque de condensados a una temperatura aproximada de 75°F, incrementando el consumo energético requerido para la generación de vapor.

Durante la evaluación se analizaron diferentes condiciones de operación de los gases de combustión, considerando una temperatura ambiente de 80°F. Las mediciones mostraron cuatro escenarios característicos de temperatura de gases de chimenea y porcentaje de oxígeno residual: 3% de O<sub>2</sub> a 370°F, 7% de O<sub>2</sub> a 500°F, 11% de O<sub>2</sub> a 630°F y 15% de O<sub>2</sub> a 760°F. Estas condiciones permitieron estudiar el efecto del exceso de aire y de la temperatura de los gases sobre la

---

<sup>1</sup> *PhD en eficiencia Energética, Master en Energía Renovable y Eficiencia Energética y en Ingeniería del Azúcar, egresado de la Universidad de San Carlos de Guatemala como Ingeniero Químico, Código 472 del Registro Nacional de Investigadores (RNI), Ha dictado seminarios sobre energía y procesos a gerentes de producción a nivel de Centroamérica y Panamá, dirigido industrias de cemento, aceites y grasas, jabones y detergentes, extractoras de minerales metálicos y director de la División de Servicios Técnicos Industriales del Instituto Centroamericano de Investigación y Tecnología Industrial ICAITI). Dirigió el programa regional (Centroamérica y Panamá) CURECA sobre eficiencia energética en la industria y en el sector vehicular de la Comisión Europea. Ha realizado 135 estudios de energía a nivel de Centroamérica, Panamá y Brasil, profesor en varias universidades nacionales e internacionales y ha impartido 32 cursos diferentes correspondiente al área profesional de Ingeniería Química y energía en Licenciaturas, Maestrías y Doctorados en el área de eficiencia energética y sostenibilidad ambiental. Ha sido Decano de la Facultad de Ingeniería y Director de Ingeniería Química en la Universidad Rafael Landívar durante 10 años. Es autor del libro: Balance de materia y energía para equipos de proceso y de potencia con ISBN 99922-2.335-9. Aparece en la revista Who is Who in the World of United Nations Framework Convention on Climate Change . [proenergia.com@gmail.com](mailto:proenergia.com@gmail.com)*

## **Análisis de variables de operación y desempeño energético en una caldera pirotubular de una fábrica de alimentos enlatados**

eficiencia de combustión y el consumo de combustible.

Los resultados obtenidos evidenciaron variaciones significativas en el desempeño energético del sistema. El consumo de combustible durante el período evaluado osciló entre 180 y 300 galones por hora, dependiendo de las condiciones operativas consideradas. Asimismo, el costo de generación de 1,000 libras de vapor presentó fluctuaciones importantes, alcanzando valores entre 15 y 20 USD. Estos resultados demuestran la importancia del control y optimización de las variables de operación para mejorar la eficiencia energética y reducir los costos de producción en sistemas industriales de generación de vapor.

**Palabras clave:** Generación vapor; ahorro energía; calderas pirotubulares, balances de masa y energía, eficiencia térmica.

### **ABSTRACT**

In the present study, an operational evaluation of a steam generation system belonging to a canned food factory was carried out, with the purpose of determining the behavior of the main variables affecting the thermal efficiency of the boiler and the cost of steam production. To this end, systematic monitoring was conducted over a period of 14 days, with data recorded eight times per day. Subsequently, the information obtained was processed through statistical analyses and control charts, in order to identify operational trends, system stability, and energy performance conditions.

The plant is equipped with a firetube boiler of 750 BHP, with a production capacity of 21,450 lb/h of saturated steam at 125 PSIA. The fuel used is bunker C, with a heating value of 150,000 BTU/gallon and

an average cost of 2.00 USD/gallon. The feedwater enters the boiler at 140°F, while the blowdown represents 1.80% by weight of the steam generated. Additionally, approximately 3% of the steam produced is lost during distribution due to leaks and maintenance requirements.

The condensate returns system presents significant thermal losses, due to the fact that the piping lacks insulation and the return tank is open, in addition to being located at a considerable distance from the consumption points due to the plant's topographical conditions. As a result, the makeup water and blowdown return to the condensate tank at an approximate temperature of 75°F, increasing the energy consumption required for steam generation.

During the evaluation, different operating conditions of the combustion gases were analyzed, considering an ambient temperature of 80°F. The measurements revealed four characteristic scenarios of flue gas temperature and residual oxygen percentage: 3% O<sub>2</sub> at 370°F, 7% O<sub>2</sub> at 500°F, 11% O<sub>2</sub> at 630°F, and 15% O<sub>2</sub> at 760°F. These conditions allowed for the study of the effect of excess air and flue gas temperature on combustion efficiency and fuel consumption.

The results obtained evidenced significant variations in the energy performance of the system. Fuel consumption during the evaluated period ranged between 180 and 300 gallons per hour, depending on the operating conditions considered. Likewise, the cost of generating 1,000 pounds of steam presented notable fluctuations, reaching values between 15 and 20 USD. These results demonstrate the importance of controlling and optimizing operating variables to improve energy efficiency and reduce production

## **Análisis de variables de operación y desempeño energético en una caldera pirotubular de una fábrica de alimentos enlatados**

costs in industrial steam generation systems.

**Keywords:** Steam generation; energy savings; firetube boilers; mass and energy balances; thermal efficiency.

### **INTRODUCCIÓN**

La generación de vapor constituye uno de los servicios industriales más importantes dentro de las plantas de procesamiento de alimentos, debido a que interviene directamente en operaciones de cocción, esterilización, calentamiento, lavado y limpieza sanitaria. En la industria de alimentos enlatados, el vapor representa una fuente esencial de energía térmica para garantizar la inocuidad del producto y la continuidad operacional de los procesos productivos. Como consecuencia, el desempeño energético de las calderas influye de manera significativa sobre los costos de producción, el consumo de combustible y la competitividad industrial.

En los sistemas industriales de generación de vapor, las condiciones de operación de la caldera determinan la eficiencia térmica y el aprovechamiento energético del combustible utilizado. Variables como el porcentaje de exceso de aire, la temperatura de los gases de combustión, la calidad del retorno de condensados, las pérdidas por purga y las fugas en la distribución de vapor afectan directamente el consumo energético y el costo de producción del vapor. Cuando estas variables no son controladas adecuadamente, se producen incrementos importantes en el consumo de combustible y disminuciones en la eficiencia global del sistema. (Capehart, B., Turner, W., & Kennedy, W. 2008)

Las calderas pirotubulares continúan siendo ampliamente utilizadas en la industria alimentaria debido a su confiabilidad operacional, facilidad de mantenimiento y capacidad para

satisfacer demandas moderadas de vapor. Sin embargo, este tipo de equipos presenta pérdidas térmicas asociadas a la combustión, transferencia de calor, purgas y distribución del vapor, las cuales pueden representar oportunidades importantes de optimización energética. Por esta razón, el monitoreo y análisis de las variables de operación permiten identificar desviaciones del comportamiento normal del sistema y establecer estrategias para mejorar el desempeño energético. (Rajput, E. 2013)

Diversos estudios de eficiencia energética industrial han demostrado que una parte considerable de las pérdidas energéticas en sistemas de generación de vapor está relacionada con excesos de aire elevados, altas temperaturas de gases de chimenea y deficiencias en los sistemas de recuperación de condensados. Asimismo, la ausencia de aislamiento térmico y las pérdidas de vapor durante la distribución generan incrementos significativos en el consumo de combustible y en los costos operacionales. En consecuencia, la evaluación sistemática de las variables operativas constituye una herramienta fundamental para la identificación de proyectos de ahorro energético y reducción de costos en la industria. (Krtati, M. 2000)

En el presente trabajo se realizó el análisis operacional y energético de una caldera pirotubular utilizada en una fábrica de alimentos enlatados, con el propósito de evaluar el comportamiento de las principales variables que afectan la eficiencia de generación de vapor. Para ello, se efectuó un monitoreo continuo de las condiciones de operación durante catorce días, registrando variables relacionadas con el consumo de combustible, porcentaje de oxígeno residual, temperatura de gases de combustión, pérdidas de vapor y

## **Análisis de variables de operación y desempeño energético en una caldera pirotubular de una fábrica de alimentos enlatados**

condiciones del sistema de retorno de condensados. Posteriormente, la información obtenida fue analizada mediante herramientas estadísticas y gráficas de control para identificar tendencias de operación y oportunidades de optimización energética. (Vanek, F., & Albright, L. 2008)

Los resultados obtenidos permiten establecer criterios técnicos para mejorar la eficiencia térmica del sistema de generación de vapor, reducir el consumo específico de combustible y disminuir el costo de producción de vapor en la planta industrial. Asimismo, el estudio proporciona una metodología aplicable a otros sistemas industriales de generación de vapor que requieran evaluaciones energéticas orientadas al ahorro de energía y mejora de la competitividad operacional.

### **CÁLCULOS DE VARIABLES**

#### **Determinación de eficiencias de combustión**

Para 3% O<sub>2</sub> y 290°F la eficiencia combustión es 88.2%, y 15.8% exceso aire, para 7% O<sub>2</sub> y 420°F y la eficiencia combustión es 82.7%, y 47.3% exceso aire, para 11% O<sub>2</sub> y 550°F la eficiencia combustión es 73.2% y 104.1% exceso aire y para 15% O<sub>2</sub> y 680°F la eficiencia combustión 51.4% y 236.4% exceso aire (David F. Dyer, 1981)

#### **Determinación de eficiencias de caldera**

La eficiencia de una caldera puede definirse desde distintos enfoques uno de ellos establece que la eficiencia de caldera equivale a la eficiencia de combustión menos las pérdidas térmicas asociadas, las cuales corresponden principalmente a las pérdidas por

radiación y por purga en calderas que operan en condiciones normales con un porcentaje de carga entre el 80 y 90% y que cuentan con un tratamiento químico primario y secundario adecuado, dichas pérdidas suelen ser del orden del 2% por ello, para fines de este documento se va a aplicar con confianza esta regla empírica (conocida como "regla del pulgar") la cual resulta bastante precisa en la práctica dentro de los límites que se habló al principio de este. (Palacios J.L, P. A. 2015)

$\eta$  caldera =  $\eta$  combustión - 2%, para 3% O<sub>2</sub> y 290°F, la eficiencia caldera es 86.2%, para 7% O<sub>2</sub> y 420°F, la eficiencia caldera es 80.7%, para 11% O<sub>2</sub> y 550°F, la eficiencia de caldera es 70.8%, para 15% O<sub>2</sub> y 680°F la eficiencia de caldera es 49.4%

#### **A. para gases de chimenea de 3% de O<sub>2</sub> y 370°F**

para 3% O<sub>2</sub> y 290°F la eficiencia combustión es 88.2% y 15.80% exceso aire, y para 3% O<sub>2</sub> y 290°F la eficiencia caldera es 86.2%. Un exceso de aire del 15% maximiza la eficiencia del sistema, debido a que minimiza el impacto del nitrógeno en las pérdidas de calor sensibles a través de la chimenea (David F. Dyer, 1981)

1 pérdida de energía en la chimenea en BTU/hora

Combustible utilizado:

$$\frac{\text{galones búnker}}{\text{hr}} =$$

## Análisis de variables de operación y desempeño energético en una caldera pirotubular de una fábrica de alimentos enlatados

$$\frac{\left(21,450 \frac{\text{lb vapor}}{\text{hr}}\right) (1,191.45 - 107.99) \frac{\text{Btu}}{\text{lb}}}{\left(150,000 \frac{\text{Btu}}{\text{gal}}\right) (86.2)} \quad (100)$$

$$= 179.74 \frac{\text{gal}}{\text{hr}}$$

Perdida de energía en la chimenea:

$$E = \left(\frac{\text{gal}}{\text{hr}}\right) \left(\frac{\text{Btu}}{\text{gal}}\right) (\eta_{\text{comb.}})$$

$$= \left(179.74 \frac{\text{gal}}{\text{hr}}\right) \left(150,000 \frac{\text{Btu}}{\text{gal}}\right) (0.882)$$

$$= 23,779,602 \frac{\text{Btu}}{\text{hr}}$$

2. agua de alimentación a la caldera

$$\left(\frac{21,450 \frac{\text{lb vapor}}{\text{hr}}}{98.2\%}\right) (100\%)$$

$$= 21,843.18 \frac{\text{lb agua}}{\text{hr}}$$

3. costo de 1,000 libras de vapor

$$\text{CEC} = \left(\frac{\frac{\$}{\text{gal}}}{\text{LHH}}\right) = \left(\frac{2.0 \frac{\$}{\text{gal}}}{0.15}\right) = 15.48 \frac{\$}{\text{MBtu}}$$

$$\text{CEA} = \left(\frac{\text{CEC}}{\eta_{\text{caldera}}}\right) = \left(\frac{15.48}{0.862}\right)$$

$$= 17.96 \frac{\$}{\text{MBtu}}$$

$$\text{costo vapor} = \frac{(\text{CEA})(\Delta \text{vapor} - \Delta \text{a. a. c.})}{1,000}$$

$$= \frac{\left(17.96 \frac{\$}{\text{MBtu}} (1,191.45 - 107.99) \frac{\text{Btu}}{\text{lb}}\right)}{1,000}$$

$$= 19.46 \frac{\$}{1,000 \text{ lb vapor}}$$

4. temperatura que ingresa al tanque de condensados

$$\left(21,843.18 \frac{\text{lb agua}}{\text{hr}}\right) (140F)$$

$$= \left(21,450 \frac{\text{lb cond.}}{\text{hr}}\right) (0.97)(F) +$$

$$(21,843.18 - 21,450) \frac{\text{lb A. R.}}{h} (75F)$$

De aquí:

$$\left(21,450 \frac{\text{lb cond.}}{\text{hr}}\right) (0.97)(F)$$

$$= \left(21,843.18 \frac{\text{lb agua}}{\text{hr}}\right) (140F)$$

$$- (21,843.18 - 21,450) \frac{\text{lb A. R.}}{h} (75F)$$

$$(F) = \frac{(3,058,045) - (29,488.5)}{20,806.5}$$

$$= 145.56F (63^{\circ}\text{C})$$

### B. para gases de chimenea de 7% de O<sub>2</sub> y 500°F

Para 7% O<sub>2</sub> y 420°F la eficiencia de combustión es 82.7% y 47.3% exceso aire y para 7% O<sub>2</sub> y 420°F la eficiencia caldera es 80.7%. Un exceso de aire del 47% se establece como el límite operativo superior, dado que maximiza las pérdidas de energía por la chimenea debido al volumen de nitrógeno utilizado (David F. Dyer, 1981).

1. pérdida de energía en la chimenea en BTU/hora

Combustible utilizado:

$$\frac{\text{galones búnker}}{\text{hr}}$$

$$= \frac{\left(21,450 \frac{\text{lb vapor}}{\text{hr}}\right) (1,191.45 - 107.99) \frac{\text{Btu}}{\text{lb}}}{\left(150,000 \frac{\text{Btu}}{\text{gal}}\right) (80.70)} \quad (100)$$

## Análisis de variables de operación y desempeño energético en una caldera pirotubular de una fábrica de alimentos enlatados

$$= 191.99 \frac{\text{gal}}{\text{hr}}$$

Perdida de energía en la chimenea:

$$\begin{aligned} E &= \left( \frac{\text{gal}}{\text{hr}} \right) \left( \frac{\text{Btu}}{\text{gal}} \right) (\eta_{\text{comb.}}) \\ &= \left( 191.99 \frac{\text{gal}}{\text{hr}} \right) \left( 150,000 \frac{\text{Btu}}{\text{gal}} \right) (0.827) \\ &= \mathbf{23,816,360 \frac{\text{Btu}}{\text{hr}}} \end{aligned}$$

2. agua de alimentación a la caldera

$$\begin{aligned} &\left( \frac{21,450 \frac{\text{lb vapor}}{\text{hr}}}{98.2\%} \right) (100\%) \\ &= \mathbf{21,843.18 \frac{\text{lb agua}}{\text{hr}}} \end{aligned}$$

3. costo de 1,000 libras de vapor

$$\text{CEC} = \left( \frac{\frac{\$}{\text{gal}}}{\text{LHH}} \right) = \left( \frac{2.0 \frac{\$}{\text{gal}}}{0.15} \right) = 15.48 \frac{\$}{\text{MBtu}}$$

$$\begin{aligned} \text{CEA} &= \left( \frac{\text{CEC}}{\eta_{\text{caldera}}} \right) = \left( \frac{15.48}{0.807} \right) \\ &= 19.18 \frac{\$}{\text{MBtu}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{costo vapor} &= \frac{(\text{CEA})(\Delta \text{vapor} - \Delta \text{a. a. c.})}{1,000} \\ &= \frac{\left( 19.18 \frac{\$}{\text{MBtu}} (1,191.45 - 107.99) \frac{\text{Btu}}{\text{lb}} \right)}{1,000} \\ &= \mathbf{20.78 \frac{\$}{1,000 \text{ lb vapor}}} \end{aligned}$$

4. temperatura del condensado que ingresa al tanque de retorno de condensados

$$\begin{aligned} &\left( 21,843.18 \frac{\text{lb agua}}{\text{hr}} \right) (140F) \\ &= \left( 21,450 \frac{\text{lb cond.}}{\text{hr}} \right) (0.97)(F) + \\ &(21,843.18 - 21,450) \frac{\text{lb A.R.}}{h} (75F) \end{aligned}$$

De aquí:

$$\begin{aligned} &\left( 21,450 \frac{\text{lb cond.}}{\text{hr}} \right) (0.97)(F) \\ &= \left( 21,843.18 \frac{\text{lb agua}}{\text{hr}} \right) (140F) \\ &- (21,843.18 - 21,450) \frac{\text{lb A.R.}}{h} (75F) \\ (F) &= \frac{(3,058,045) - (29,488.5)}{20,806.5} \\ &= \mathbf{145.56F (63^\circ\text{C})} \end{aligned}$$

### C. para gases de chimenea de para 11% O<sub>2</sub> y 630°F

Para 11% O<sub>2</sub> y 550°F la eficiencia combustión es 73.2%, y 104.1% exceso aire y para 11% O<sub>2</sub> y 550°F la eficiencia caldera es 71.2%. Un exceso de aire del 104.1% resulta contraproducente, ya que incrementa significativamente las pérdidas de calor sensible en los gases de combustión. Esto se debe al elevado volumen de nitrógeno —un gas inerte en el proceso— que actúa como sumidero térmico al ser evacuado por la chimenea. (Potter, M., & Scott, E. 2004)

1. pérdida de energía en la chimenea en BTU/hora

Combustible utilizado:

## Análisis de variables de operación y desempeño energético en una caldera pirotubular de una fábrica de alimentos enlatados

$$\frac{\text{galones búnker}}{\text{hr}}$$

$$= \frac{\left(21,450 \frac{\text{lb vapor}}{\text{hr}}\right) (1,191.45 - 107.99) \frac{\text{Btu}}{\text{lb}}}{\left(150,000 \frac{\text{Btu}}{\text{gal}}\right) (71.2)} (100) \left(21,843.18 \frac{\text{lb agua}}{\text{hr}}\right) (140F)$$

$$= 217.61 \frac{\text{gal}}{\text{hr}}$$

Perdida de energía en la chimenea:

$$E = \left(\frac{\text{gal}}{\text{hr}}\right) \left(\frac{\text{Btu}}{\text{gal}}\right) (\eta_{\text{comb.}})$$

$$= \left(217.61 \frac{\text{gal}}{\text{hr}}\right) \left(150,000 \frac{\text{Btu}}{\text{gal}}\right) (0.732)$$

$$= \mathbf{23,893,578 \frac{\text{Btu}}{\text{hr}}}$$

2. agua de alimentación a la caldera

$$\left(\frac{21,450 \frac{\text{lb vapor}}{\text{hr}}}{98.2\%}\right) (100\%)$$

$$= \mathbf{21,843.18 \frac{\text{lb agua}}{\text{hr}}}$$

3. costo de 1,000 libras de vapor

$$\text{CEC} = \left(\frac{\frac{\$}{\text{gal}}}{\text{LHH}}\right) = \left(\frac{2.0 \frac{\$}{\text{gal}}}{0.15}\right) = 15.48 \frac{\$}{\text{MBtu}}$$

$$\text{CEA} = \left(\frac{\text{CEC}}{\eta_{\text{caldera}}}\right) = \left(\frac{15.48}{0.712}\right) = 21.74 \frac{\$}{\text{MBtu}}$$

$$\text{costo vapor} = \frac{(\text{CEA})(\Delta \text{vapor} - \Delta \text{a. a. c.})}{1,000}$$

$$= \frac{\left(21.74 \frac{\$}{\text{MBtu}} (1,191.45 - 107.99) \frac{\text{Btu}}{\text{lb}}\right)}{1,000}$$

$$= \mathbf{23.554 \frac{\$}{1,000 \text{ lb vapor}}}$$

4. temperatura del condensado que ingresa al tanque de retorno de condensados

$$= \left(21,450 \frac{\text{lb cond.}}{\text{hr}}\right) (0.97)(F)$$

$$+ (21,843.18 - 21,450) \frac{\text{lb A. R.}}{h} (75F)$$

De aquí:

$$\left(21,450 \frac{\text{lb cond.}}{\text{hr}}\right) (0.97)(F)$$

$$= \left(21,843.18 \frac{\text{lb agua}}{\text{hr}}\right) (140F)$$

$$- (21,843.18 - 21,450) \frac{\text{lb A. R.}}{h} (75F)$$

$$(F) = \frac{(3,058,045) - (29,488.5)}{20,806.5}$$

$$= \mathbf{145.56F (63^{\circ}\text{C})}$$

D. para gases de chimenea de 15% de O<sub>2</sub> y 760°F

Para 15% O<sub>2</sub> y 680°F la eficiencia de combustión es 51.4% y 236.4% exceso aire y para 15% O<sub>2</sub> y 680°F la eficiencia caldera es 49.4%. Un exceso de aire del 236% penaliza severamente el rendimiento del sistema. Debido a que el aire está compuesto por un 79% de nitrógeno —un gas inerte en la reacción—, este volumen excedente actúa como un lastre térmico, absorbiendo y transportando una fracción masiva de la energía liberada hacia la atmósfera a través de los gases de escape (García Borrás, T.1983)

1. pérdida de energía en la chimenea en BTU/hora

## Análisis de variables de operación y desempeño energético en una caldera pirotubular de una fábrica de alimentos enlatados

Combustible utilizado:

$$\frac{\text{galones búnker}}{\text{hr}} = \frac{\left(21,450 \frac{\text{lb vapor}}{\text{hr}}\right) (1,191.45 - 107.99) \frac{\text{Btu}}{\text{lb}}}{\left(150,000 \frac{\text{Btu}}{\text{gal}}\right) (49.40)} (100\%)$$

$$= 313 \frac{\text{gal}}{\text{hr}}$$

Perdida de energía en la chimenea:

$$E = \left(\frac{\text{gal}}{\text{hr}}\right) \left(\frac{\text{Btu}}{\text{gal}}\right) (\eta_{\text{comb.}})$$

$$= \left(313 \frac{\text{gal}}{\text{hr}}\right) \left(150,000 \frac{\text{Btu}}{\text{gal}}\right) (0.514)$$

$$= 24,132,300 \frac{\text{Btu}}{\text{hr}}$$

2. agua de alimentación a la caldera

$$\left(\frac{21,450 \frac{\text{lb vapor}}{\text{hr}}}{98.2\%}\right) (100\%)$$

$$= 21,843.18 \frac{\text{lb agua}}{\text{hr}}$$

3. costo de 1,000 libras de vapor

$$\text{CEC} = \left(\frac{\frac{\$}{\text{gal}}}{\text{LHH}}\right) = \left(\frac{2.0 \frac{\$}{\text{gal}}}{0.15}\right) = 15.48 \frac{\$}{\text{MBtu}}$$

$$\text{CEA} = \left(\frac{\text{CEC}}{\eta_{\text{caldera}}}\right) = \left(\frac{15.48}{0.494}\right)$$

$$= 31.34 \frac{\$}{\text{MBtu}}$$

costo vapor =

$$\frac{(\text{CEA})(\Delta \text{vapor} - \Delta \text{a. a. c.})}{1,000} = \frac{\left(31.34 \frac{\$}{\text{MBtu}} (1,191.45 - 107.99) \frac{\text{Btu}}{\text{lb}}\right)}{1,000}$$

$$= 33.96 \frac{\$}{1,000 \text{ lb vapor}}$$

4. temperatura del condensado que ingresa al tanque de retorno de condensados:

$$\left(21,843.18 \frac{\text{lb agua}}{\text{hr}}\right) (140F)$$

$$= \left(21,450 \frac{\text{lb cond.}}{\text{hr}}\right) (0.97)(F)$$

$$+ (21,843.18 - 21,450) \frac{\text{lb A. R.}}{h} (75F)$$

De aquí:

$$\left(21,450 \frac{\text{lb cond.}}{\text{hr}}\right) (0.97)(F)$$

$$= \left(21,843.18 \frac{\text{lb agua}}{\text{hr}}\right) (140F)$$

$$- (21,843.18 - 21,450) \frac{\text{lb A. R.}}{h} (75F)$$

$$(F) = \frac{(3,058,045) - (29,488.5)}{20,806.5}$$

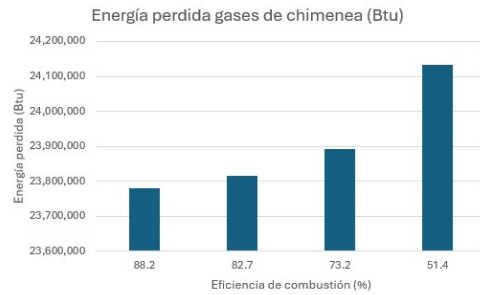
$$= 145.56F (63^{\circ}\text{C})$$

## GRAFICOS

## Análisis de variables de operación y desempeño energético en una caldera pirotubular de una fábrica de alimentos enlatados

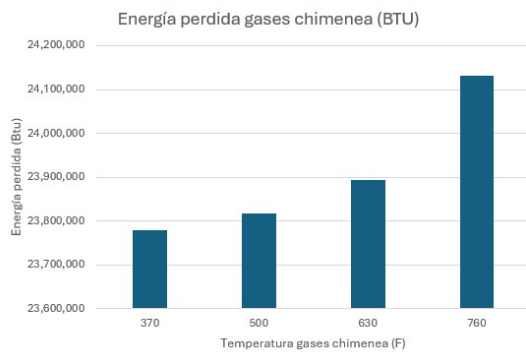
Gráfica de la energía perdida en BTU de los gases de chimenea en cada uno de los casos contra eficiencia de combustión:

Energía perdida (BTU/hr)	Eficiencia combustión (%)
23,779,602	88.2
23,816,360	82.7
23,893,578	73.2
24,132,300	51.4



Gráfica de la energía perdida en BTU de los gases de chimenea en cada uno de los casos contra la temperatura de la chimenea:

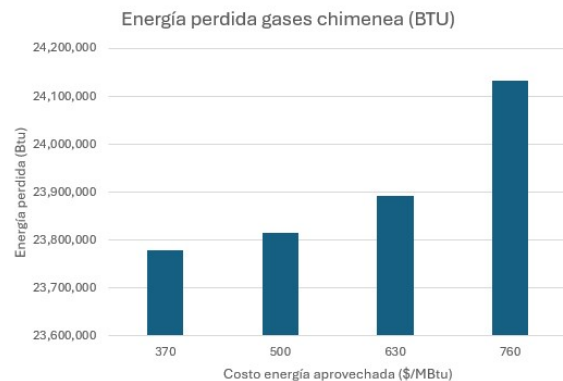
Energía perdida (BTU/hr)	Temperatura gases de chimenea F
23,779,602	370
23,816,360	500
23,893,578	630
24,132,300	760



casos contra la temperatura de la chimenea:

Gráfica de la energía perdida en BTU de los gases de chimenea contra el costo de la energía aprovechada:

Energía perdida (BTU/hr)	Costo energía aprovechada (\$/MBTU)
23,779,602	370
23,816,360	500
23,893,578	630
24,132,300	760

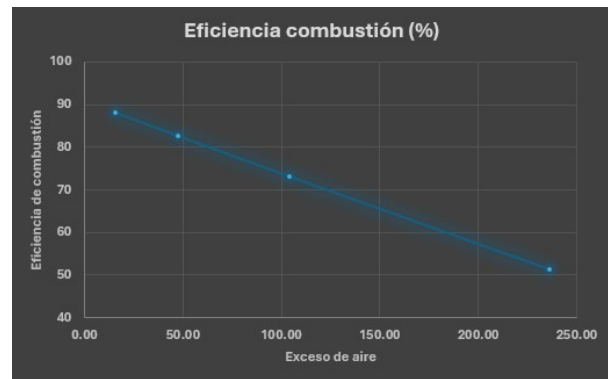


Gráfica de exceso de aire de combustión en % contra la eficiencia de combustión:

Exceso de aire (%)	Eficiencia combustión (%)
15.80	88.2
47.30	82.7

## Análisis de variables de operación y desempeño energético en una caldera pirotubular de una fábrica de alimentos enlatados

104.10	73.2
236.40	51.4



### CONCLUSIONES

1. La gráfica de la energía perdida en los gases de combustión (BTU/h) en función de la eficiencia de combustión muestra que, al disminuir la eficiencia de combustión de 88.2% a 51.4%, las pérdidas energéticas a través de los gases de chimenea aumentan de 23,779,602 BTU/h a 24,132,300 BTU/h. Este comportamiento se debe principalmente al incremento del exceso de nitrógeno presente en el aire de combustión, el cual no participa en la reacción química y absorbe parte de la energía térmica generada, reduciendo así el aprovechamiento energético de la caldera.
2. La gráfica de la energía perdida en los gases de chimenea respecto a la temperatura de los gases de combustión evidencia que, al incrementarse la temperatura de salida de 370°F a 760°F, aumentan considerablemente las pérdidas de energía hacia la atmósfera. Este comportamiento confirma que temperaturas elevadas en la chimenea representan un indicador de ineficiencia térmica, debido a que una mayor fracción del calor generado no es transferida al sistema de generación de vapor.
3. La relación entre la energía perdida en los gases de combustión y el costo de la energía aprovechada demuestra que, conforme se incrementan las pérdidas térmicas, también aumenta el costo energético del proceso. Debido a que el costo de la energía útil depende directamente de la eficiencia de combustión, una menor eficiencia ocasiona un mayor consumo de combustible para producir la misma cantidad de vapor, incrementando así el costo operativo del sistema.
4. La gráfica del exceso de aire de combustión en función de la eficiencia de combustión muestra que el exceso de aire varió entre 15.8% y 236.4%, afectando significativamente el desempeño térmico de la caldera. El exceso de aire constituye uno de los parámetros operacionales más importantes en los generadores de vapor, ya que el aire atmosférico contiene únicamente aproximadamente 21% de oxígeno y cerca de 79% de nitrógeno. En consecuencia, un exceso elevado de aire

## Análisis de variables de operación y desempeño energético en una caldera pirotubular de una fábrica de alimentos enlatados

incrementa la cantidad de nitrógeno que debe calentarse y evacuarse por la chimenea, provocando mayores pérdidas

térmicas y una disminución considerable de la eficiencia de combustión.

### BIBLIOGRAFÍA

- Wong, R., & Whittingham, E. (2006). *A Comparison of Combustion Technologies for Electricity Generation* (2a. ed.). Canada: The Pembina Institute.
- Abadie, L., & Chamorro, J. (2006). Valuing flexibility: the case of an integrated gasification combined power plant. *Energy Economics*. Recuperado el enero de 2008, de <http://dx.doi.org/10.1016/j.eneco.2006.10.004>
- ACOGEN. (s.f.). *Cogeneración, ¿Qué es?* Obtenido de ACOGEN: <http://www.acogen.es/ques.php>
- Bernard, F. (2010). *Small Scale Cogeneration Handbook* (4th. ed.).
- Boehm, R. (1997). *Developments in the Design of Thermal Systems*. Cambridge.
- Boxwell, M. (2012). *Solar Electricity Handbook*. United Kingdom: Greenstream Publishing .
- Boyce, M. (2010). *Handbook of Cogeneration and Combined Cycle Power Plants* (2nd. ed.). ASME Press.
- Canadian Electricity Association. (2006). *Power generation in Canada, a guide, 2006*. Recuperado el 22 de enero de 2008, de <http://www.canelect.ca/en/Pdfs/HandBook.pdf>
- Capehart, B., Turner, W., & Kennedy, W. (2008). *Guide to Energy Management* (Fifth edition ed.). United States of America: Fairmont Press, Inc.
- 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.
- EcuRed. (s.f.). *Cogeneración*. Obtenido de EcuRed: <https://www.ecured.cu/Cogeneracion%C3%B3n>
- El-Wakil, M. (2002). *Powerplant Technology*. New York: College Custom Series.
- García Borrás, T. (1983). *Boiler and Furnace Performance*. Houston: Gulf Publishing Company.
- García Garrido, S. (s.f.). *Turbinas de vapor*. Obtenido de Renovetec: <http://www.renovetec.com/articulos/turbinasdevapor.html>
- Goswami, Y., & Kreith, F. (2008). *Energy Conservation*. United States of America: CRC Press.
- Hoffman, E. (1996). *Power Cycles and Energy Efficiency*. New York: Editorial Academic Press.
- Horlock, J. (2002). *J.H. Horlock. Cogeneration: Combined Heat and Power*. Pergamon Press, 2002.
- Jutglar, L. (2001). *Cogeneración de Calor y Electricidad*. CEAC.
- Kanoglu, M., Cengel, Y., & Cimbala, J. (2019). *Fundamentals and Applications of Renewable Energy* (1a ed.). New York: Mc Graw Hill.

## **Análisis de variables de operación y desempeño energético en una caldera pirotubular de una fábrica de alimentos enlatados**

- Krarti, M. (2000). *Energy Audits of Building Systems*. United States of America: CRC Press.
- Kyle, B. (1999). *Chemical and Process Thermodynamics* (Third Edition ed.). New Jersey: Prentice Hall.
- Limaye, D. (1985). *Planning Cogeneration Systems*. Fairmont Press, Inc.
- Potter, M., & Scott, E. (2004). *Thermal Sciences*. United States of America: Thomson.
- Rajput, E. (2013). *Power Plant Engineering* (Fourth Edition ed.). New Delhi: Laxmi Publications.
- Rayaprolu, K. (2009). *Boilers for Power and Process*. Boca Raton, Florida: CRC Press Taylor & Francis Group.
- Rayaprolu, K. (2009). *Boilers Power and Process*. United States of America: CRC Press.
- Sandler, S. (1997). *Chemical and Engineering Thermodynamics* (Third Edition ed.). New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Santizo Calderón, M. (2007). *Balance de Materia y Energía para procesos y potencia*. Guatemala: Policolor.
- Santizo, M. (2008). *Planta ciclo combinado centroamérica de 15 MW*. Guatemala: Informe.
- Santizo, M. (2008). *Planta ciclo combinado Cristal 10 MW*. Guatemala: Informe.
- Thuman, A., & Dunning, S. (2008). *Guide to Energy Conservation* (Ninth Edition ed.). New York: Fairmont Press, Inc.
- Vanek, F., & Albright, L. (2008). *Energy Systems Engineering: Evaluation & Implementation*. New York: Mc Graw Hill.
- David F. Dyer, Boiler Efficiency Improvement  
1981, Efficiency Energy USA