

Análisis de un Software para Determinar el Combustible Óptimo para una Caldera

G.E. Pando-Martínez¹, P. Mayorga-Ortíz², H.D. Magaña-Almaguer³, F. Ramírez-Moreno⁴, J.G. Pando-Jaime⁵.

Resumen— Este trabajo, propone el desarrollo de un software que incorpora las variables más importantes para determinar el consumo de combustible en una caldera. Para el desarrollo del mismo, se realizó un análisis a diferentes factores técnico-económicos que afectan el consumo de combustible en la caldera y de los cuales se tiene una medición, obteniéndose una serie de ecuaciones, que al relacionarlas entre sí permiten determinar el consumo de combustible. El software realizado permite al usuario la toma de decisiones, ya que le muestra los ahorros obtenidos al utilizar gas natural o combustóleo como combustible en la caldera.

Palabras claves—Caldera, Combustóleo, Gas natural Software.

Abstract— This work proposes the development of a software that incorporates the most important variables to determine the fuel consumption in a boiler. For the development of the same, an analysis was made to different technical-economic factors that affect the consumption of fuel in the boiler and of which there is a measurement, obtaining a series of equations, which by relating them together allow to determine the consumption of fuel. The software made allows the user to make decisions, since it shows the savings obtained by using natural gas or fuel oil as fuel in the boiler.

Keywords— Boiler, Fuel oil, Natural gas, Software.

I. INTRODUCCIÓN

La demanda de energía, que es la principal fuente del desarrollo económico, ha ido aumentando día a día. Los recursos energéticos del mundo han sido limitados, por lo que los países han cambiado sus políticas energéticas con la tendencia de usar la energía más eficientemente [1].

La energía siempre ha desempeñado un papel importante en el desarrollo humano y económico, así como en el bienestar de las sociedades. Es un elemento esencial para la calidad de vida del ser humano y un insumo básico en todas las actividades productivas, así que cualquier crecimiento de la economía global genera un aumento necesario en el consumo de energéticos. Al mismo tiempo, el consumo de energía es sensible a cualquier variación en los precios de los energéticos, ya que si éstos se elevan, el consumo de energía tiende a disminuir.

La reducción en el uso del combustóleo a escala mundial se debe, entre otros factores, a la sustitución de éste por otros energéticos más limpios (p.ej. gas natural), tanto en el sector eléctrico como en el industrial. Esta situación persigue disminuir las emisiones a la atmósfera a la vez que aumenta la eficiencia en la generación de electricidad y en algunos procesos industriales.

Li y colaboradores, analizaron varios combustibles para la generación de vapor sobrecalentado, sin embargo, su análisis se realizó desde un punto de vista ambiental, considerando dentro de los combustibles fósiles al gas natural como la mejor opción, asimismo, señalan que este criterio está basado únicamente en la sostenibilidad ambiental, y puede que nos sea la opción más económica por lo que se debe buscar un equilibrio, entre la parte económica y la sostenibilidad ambiental [2].

La mayoría de los procesos industriales usan vapor. Tan solo en USA se quemaron aproximadamente el 37% del total de combustibles fósiles utilizados por esa nación para producir vapor [3].

El interés del propietario de una instalación de generación de vapor será mayor en la medida en que lo sean las reducciones en la facturación de combustibles y energía eléctrica, el abatimiento de las emisiones contaminantes y el consumo de agua, la disponibilidad de mayor capacidad de generación y el incremento de la vida útil del equipo instalado.

El uso eficiente de los energéticos en el medio industrial, es de vital importancia debido al aumento de los precios en los mismos, por lo cual tiene un interés inmediato para el gerente industrial, y es éste factor el que probablemente incida con mayor influencia en la aceptación del uso correcto de la energía, y en aumento de la eficiencia. La sustitución de combustibles responde a las necesidades competitivas en la industria, siendo los cambios tecnológicos y restricciones ambientales los principales factores que impulsan. Los ahorros en los energéticos por lo tanto, se traducen en beneficios económicos directos para la empresa, ayudando a aumentar la competitividad o incrementando el margen de utilidades.

Una de las ecuaciones más sencillas y utilizadas con mayor frecuencia para la evaluación de la factibilidad económica del cambio de combustible es: *generación calorífica = Consumo de combustible x Poder calorífico inferior del combustible*, sin embargo ésta ya no es

¹ Tecnológico Nacional de México/I.T. de Mexicali, Departamento de metal-mecánica, Av. Tecnológico s/n, Colonia Elías Calles, C.P. 21376, Mexicali, Baja California, México. * pando@itmexicali.edu.mx

suficiente para determinar el combustible a utilizar, ya que no toma en cuenta entre otras variables la eficiencia en la generación del vapor, motivo por el cual se desarrolló un programa de cómputo, que incorpora las variables más importantes para determinar el consumo de combustible en una caldera, ya sea que la misma utilice gas natural o combustóleo para la generación del vapor.

Las calderas tienen diferentes variables de funcionamiento como son: generación de vapor, presión de operación, presión de vapor para precalentar el combustible, presión de atomización, temperatura de los gases de combustión, temperatura ambiental, temperatura de entrada de agua a la caldera y exceso de aire, entre otras, por lo que el software desarrollado relaciona estas variables para determinar el consumo de combustible de una manera más certera que con el simple hecho de evaluar la factibilidad del cambio únicamente determinando la generación calorífica del combustible base.

II. PARTE TÉCNICA DEL ARTÍCULO

El software desarrollado tomó como base la operación de una caldera de tubos de agua marca Babcock & Wilcox de 1500 BHP, instalada en una fábrica de papel en Mexicali, Baja California, México, la cual utiliza combustóleo o gas natural para generar el vapor. El gas natural se suministra a la fábrica a través de tuberías, mientras que el combustóleo se suministra a través de un pipa que lo descarga al tanque de almacenamiento y luego se suministra a la caldera por medio de una bomba. Para mejorar la combustión del combustóleo este debe precalentarse y atomizarse para ingresar a la cámara de combustión en forma de neblina, mientras que el gas natural no requiere estos procesos.

A. Metodología

Para la realización del análisis termoeconómico del combustóleo y gas natural utilizado en la caldera, y que involucre el mayor número de variables que incidan mayormente en el consumo del combustible (combustóleo y gas natural) se desarrolló un software según el diagrama de flujo de la figura 1, el mismo requiere como datos de entrada los parámetros que a continuación se enlistan, mismos que en su mayoría están en las bitácoras generadas diariamente por el operador de la caldera, en el caso de la temperatura ambiente y las velocidades del viento están predeterminadas según el mes en cuestión para un año típico en la ciudad de Mexicali [4] sin embargo pueden ser modificados:

- Mes.
- Generación de vapor en el mes.
- Presión de operación de la caldera.
- Días de operación de la caldera en el mes.
- Temperatura gases de combustión a la salida de la chimenea.
- Temperatura cuarto de calderas.

- Temperatura ambiente.
- Velocidad del viento.
- Temperatura agua de alimentación caldera.
- Temperatura combustóleo en el intercambiador de la caldera.
- Temperatura combustóleo en el tanque de almacenamiento.
- Presión de vapor al tanque de combustóleo.
- Presión de sopleo.
- Número de veces que se realiza el sopleo al día.
- Tiempo de duración del sopleo en ambos lados
- Presión de vapor intercambiador caldera.
- Presión vapor de atomización.
- Precio del combustóleo y gas natural.
- Precio del aditivo.
- Razón de aditivo.
- Exceso de aire con combustóleo y gas natural.
- Poder calorífico superior del combustóleo.
- Factor de conversión para el gas natural.

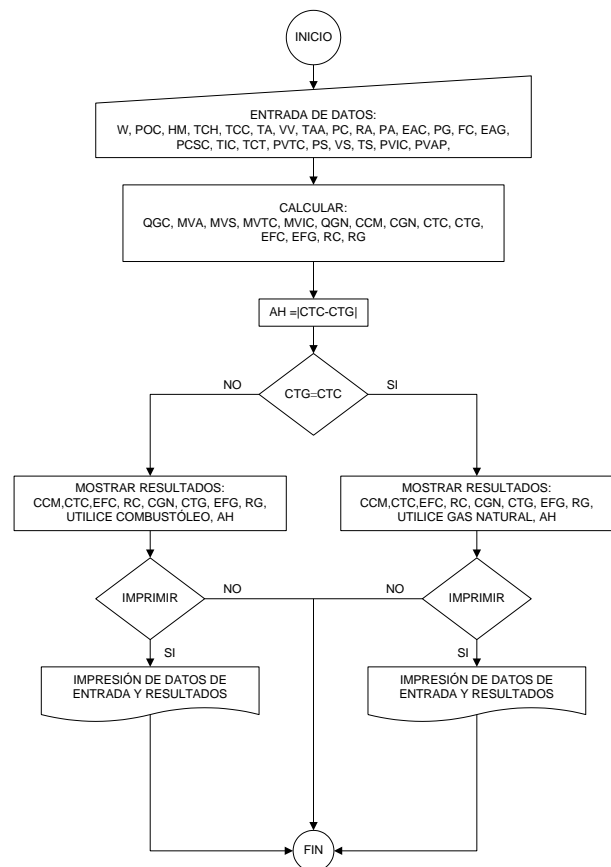


Figura 1. Diagrama de flujo

Para determinar el calor producido por la combustión de los combustibles se usa (1), mientras que para determinar las pérdidas de calor en el tanque de almacenamiento de

combustóleo se emplearon las formulas propuestas en la NOM-009-ENER-1995 [5], y para conocer la cantidad de vapor requerido para precalentar el combustóleo en el tanque se usa (2).

$$Q = \sum_P n_i (\overline{h_{P2}} - \overline{h_{P0}})_i - \sum_R n_i (\overline{h_{R2}} - \overline{h_{R0}})_i + \Delta H^0 \quad (1)$$

$$MVTA = \frac{PCTA}{h_{fg}} \quad (2)$$

La ecuación (3) es usada para conocer la masa de vapor de atomización y del vapor inyectado a la caldera [6] para realizar la limpieza de los tubos flux en operación con la finalidad de eliminar el hollín depositado en ellos (sopleo).

$$m_v = 0.02 A_2 P_1^{0.97} \quad (3)$$

El combustóleo antes de ingresar a la cámara de combustión debe ser precalentado para reducir su viscosidad, lo cual se realiza con vapor en un intercambiador de tubo y coraza, al que se le denomina intercambiador de la caldera, para determinar la cantidad de vapor necesario para llevar la temperatura del combustóleo a las condiciones de operación, es necesario realizar un balance de materia y energía al intercambiador de calor. En la figura 2 se muestra un esquema de las variables involucradas en el balance, con lo cual se obtiene (4).

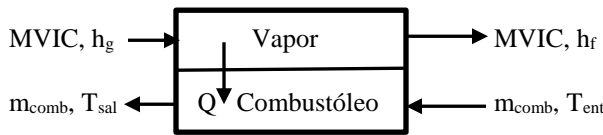


Figura 2. Esquema de un intercambiador de calor.

$$MVIC = \frac{m_{comb} C_{pcomb} (T_{sal} - T_{ent})}{h_{fg}} \quad (4)$$

Para determinar el consumo de combustóleo requerido para generar vapor en la caldera es necesario conocer el calor generado por el combustóleo según (1), la densidad del combustóleo, la cantidad de vapor usado para el precalentamiento del mismo, así como la cantidad de vapor requerida en proceso, lo cual arroja (5).

$$CCM = \frac{(W + MVA + MVS + MVTC + MVIC) - (h_v - h_{aa})}{QGC * \rho_{comb}} \quad (5)$$

Algunas empresas utilizan aditivos con el propósito de mejorar la combustión del combustóleo, disminuir la emisión de contaminantes y el potencial de corrosión entre

otros beneficios, sin embargo, el uso de estos aditivos incrementan el costo de generación [7]. Por lo tanto, es necesario incluir el costo del aditivo así como la razón de adición del mismo al combustóleo para determinar el costo de producción del vapor al utilizar combustóleo, mismo que se calcula usando (6). Por otra parte, para conocer el costo de producción de vapor al utilizar gas natural para su generación se usa (7) la cual involucra básicamente la cantidad de calor producido por el gas natural determinada con (1), la densidad del gas natural, la cantidad de vapor requerida en proceso y un factor de conversión proporcionado por la compañía suministradora del gas natural, el cual, no es más que un factor de conversión del poder calorífico del gas natural a GCal/m³, ya que la medición esta en m³ y el cobro esta en \$/GCal. Estas variables están relacionadas en (8).

$$CTC = (CCM * \$_{comb}) + (CCM * RA * \$_{ad}) \quad (7)$$

$$CTG = \left[\frac{W (h_v - h_{aa})}{QGN * \rho_{gn}} \right] * \$_{gn} \quad (8)$$

III. RESULTADOS

El software solicita como datos de entrada los mostrados con antelación, los cuales son ingresados en unidades correspondientes al sistema internacional de unidades, por lo tanto, si las mediciones se tienen en el sistema inglés, el software cuenta con un apartado para realizar las conversiones del sistema inglés al sistema internacional, la pantalla de captura de la información se puede apreciar en la figura 3, misma que contiene los datos solicitados a manera de ejemplo, para posteriormente obtener los resultados mostrados en la figura 4, los datos ingresados son los siguientes:

Mes y año	Enero 2018
Presión de operación	1310 kPa
Generación de vapor en el mes	14000000 kg
Días de operación de la caldera	31
Temperatura gases de combustión a la salida	300°C
Temperatura ambiente	14.6°C
Temperatura cuarto calderas	20°C
Velocidad del viento	8647 m/h
Temperatura agua alimentación	105°C
Temperatura combustóleo en intercambiador	121°C
Temperatura combustóleo en tq. almacenamiento	48°C
Presión vapor a tanque de almacenamiento	207 kPa
Presión de sopleo	690 kPa
No. sopleos al día	3
Duración del sopleo en ambos lados	1 min
Presión vapor en intercambiador caldera	414 kPa
Presión vapor atomización	690 kPa
Precio combustóleo	6.3 m.n/l
Razón de aditivo	0.0004 I _{ad} /I _{comb}

Precio aditivo	137.5 m.n./l
Exceso de aire combustóleo	20%
Poder calorífico combustóleo	45780 kJ/kg
Precio gas natural	331.95 m.n./GCal
Factor de conversión	0.00904245
Exceso de aire con gas natural	10%

Figura 3. Pantalla de captura de datos de entrada.

Figura 4. Pantalla de resultados.

IV. DISCUSIÓN, CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES

Una de las ecuaciones más utilizadas para seleccionar el tipo de combustible más factible a utilizar es *generación calorífica = Consumo de combustible x Poder calorífico inferior del combustible*, sin embargo, el software desarrollado incorpora las variables más importantes que pueden afectar el consumo del combustible seleccionado, las cuales en su mayoría están en los reportes generados día a día por el operador siendo éstas las que tienen mayor

incidencia en la cantidad de combustible a utilizar para la generación del vapor, haciendo que el software sea factible de ser utilizado, además se pueden determinar condiciones de funcionamiento tendientes a incrementar la eficiencia de operación.

El criterio para decidir el combustible a utilizar es básicamente el costo necesario para generar el vapor, y se despliega en la pantalla de resultados el combustible que resultó ser más factible, así como los ahorros obtenidos al seleccionarlo, sin embargo, el programa únicamente considera algunas de las variables de mayor importancia en el uso del combustible, por lo tanto es preciso señalar algunos comentarios que pudieran, dependiendo del ahorro obtenido cambiar el criterio de decisión del combustible a utilizar, estos son:

- El vapor utilizado en el precalentamiento del combustóleo, en la atomización y en el soplo es un vapor que no se retorna como condensado, por lo tanto, hay que añadir una mayor cantidad de agua de reposición que con el gas natural, misma que tiene que ser tratada.
- Para el suministro del combustóleo a la caldera se requiere del uso de una bomba, la cual demanda cierta cantidad de energía eléctrica, así como para recircular el combustóleo en el tanque (si se requiere) y para la descarga del mismo. Este costo por concepto de energía eléctrica no se obtiene con el uso del gas natural.
- El costo de mantenimiento se espera sea superior al utilizar combustóleo ya que debido a las impurezas del mismo, se forman escorias que se van acumulando, reduciendo el área de paso de los gases, aunado a lo anterior para el manejo del combustóleo se requieren más equipos como bombas, intercambiadores de calor, válvulas de alivio, reguladores de presión, termómetros, manómetros, trampas de vapor entre otros.

Es responsabilidad exclusiva del usuario el ingreso de la información solicitada y la decisión del combustible a utilizar, pudiendo ser una consideración que los ahorros obtenidos en el mes de estudio sean inferiores al posible costo generado por el tratamiento del agua y del mantenimiento.

V. AGRADECIMIENTOS

Se extiende un agradecimiento a Fábrica de Papel San Francisco y al ingeniero Alfonso González Cárdenas por su apoyo para la realización de este proyecto.

VI. APÉNDICES

TABLA I
NOMENCLATURA

Variable	Descripción
A	Área.
CCM	Consumo de combustóleo.
Cp	Calor específico a presión constante.
CTC	Costo total con combustóleo.
CTG	Costo total con gas natural.
h	Entalpía.
m	Masa.
MVA	Masa de vapor de atomización.
MVIC	Masa de vapor al intercambiador de la caldera.
MVS	Masa de vapor de soplo.
MVTA	Masa de vapor al tanque de almacenamiento.
n	Número de moles.
P	Presión.
PCTA	Pérdidas de calor en el tanque de almacenamiento.
QGC	Calor generado por el combustóleo.
QGN	Calor generado por el gas natural.
T	Temperatura.
W	Vapor requerido en proceso.
\$	Precio
Letras griegas	
ΔH°	Entalpía de combustión.
ρ	Densidad.
Σ	Sumatoria.
Subíndices	
0	Referencia.
1	Entrada.
2	Salida.
aa	Agua de alimentación.
ad	Aditivo.
comb	Combustóleo.
ent	Entrada.
fg	Vaporización.
gn	Gas natural.
i	i-ésima.
ornia	Productos.
R	Reactivos.
sal	Salida.
v	Vapor.

VII. REFERENCIAS

- [1] Kilic, G.; Sungur, B.; Topaloglu, B y Ozcan, H. (2010) "Experimental analysis on the performance and emissions of diesel/butanol/biodiesel blended fuels in a flame tube," *Applied Thermal Engineering*, 130, pp. 195-202.
- [2] Li, Ch.; Gillum, C.; Toupin, K.; Park, Y.H. y Donaldson, B. (2016) "Environmental performance assessment of utility boiler conversion systems," *Energy Conversion and Management*, 120, pp. 135-143.
- [3] Barma, M.C.; Saidur, R.; Rahman, S.M.A.; Allouhi, A.; Akash, B.A. y Sait, S.M. (2017) "A review on boilers energy use, energy savings, and emissions reductions," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79, pp. 970-983.
- [4] Gallegos, O.R.; Velázquez, L.N.; García, C.O.R.; Luna, L.A. y Bojórquez, M.G. (2008) "Construcción de un archivo típico

meteorológico para Mexicali, B.C.", presentado en la XXXII Semana Nacional de Energía Solar, Mérida, Yucatán, México.

- [5] NOM-009-ENER-1995 *Eficiencia energética en aislamientos térmicos industriales*, Diario Oficial de la Federación, 08 de Noviembre de 1995.
- [6] Baumeister T.; Avallone E. y Baumeister T. III (1987) *Manual del Ingeniero Mecánico*, Vol. 1, Octava ed., Mc Graw-Hill, p. 4-47.
- [7] Poullikkas, A. (2014) "Cost-benefit analysis for the use of additives in heavy fuel fired boilers," *Energy Conversion and Management*, 45, pp. 1725-1734.



VIII. BIOGRAFÍA

Pando Martínez Gabriel Ernesto. Nació el 07 de Noviembre de 1972, en la ciudad de Mexicali, Baja California, México. Inicia sus estudios de Ingeniería Mecánica en el año de 1989 en el Instituto Tecnológico de Mexicali, en Mexicali, Baja California, México, obteniendo el título en el año de 1994, posteriormente en 1995 inicia sus estudios de Maestría en Ingeniería Termodinámica en el Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California (UABC), en Mexicali, Baja California, México, obteniendo el grado en 2009. Y finalmente en el año 2011 inicia sus estudios de Doctorado en Ingeniería en la Especialidad de Energías Renovables, en la UABC, en Mexicali, Baja California, México, obteniendo el grado en 2016.

El actualmente es docente del Departamento de Ingeniería Metal - Mecánica en el Instituto Tecnológico de Mexicali, en Mexicali, Baja California, México. Su área de interés es todo lo relacionado a los sistemas Energéticos y Termodinámicos, así como el ahorro y uso eficiente de la energía.

El Dr. Pando es miembro del cuerpo académico "Reconocimiento de Patrones y Procesamiento Digital de Señales en Sistemas Térmicos", cuenta con el reconocimiento de Perfil Deseable y tiene autoría de múltiples artículos en revistas especializadas.



Mayorga Ortiz Pedro. Nació en Santiago Papasquiaro Durango en 1962. Realizó sus estudios de Física en la Universidad Autónoma de Baja California (UABC, 1990); sus estudios de maestría en Sistemas Digitales en el Instituto Politécnico de México, Tijuana (1998); el doctorado en Señales Imágenes Voz y telecomunicaciones en el Instituto Nacional Politécnico de Grenoble, Francia (2005);

finalmente, efectuó un posdoctorado en Bioacústica en CSULB, Long Beach.

Actualmente es profesor investigador titular C de tiempo completo en el Instituto Tecnológico de Mexicali. Además fue investigador en el Instituto de Ingeniería de la UABC en el 1993-94. El área de interés es el Procesamiento Digital de Señales y Reconocimiento de Patrones aplicado a Bioacústica y Sistemas Energéticos.

El Dr. Pedro Mayorga Ortiz, es líder de cuerpo académico en Reconocimiento de Patrones y Procesamiento Digital de Señales en Sistemas Térmicos, Perfil Promep (PRODEP); Él ha sido revisor de artículos en revistas de Elsevier, Springer, IEEE y la Sociedad Mexicana de Ingeniería Biomédica. También, cuenta con autoría de múltiples artículos de revistas y conferencias en congresos internacionales.



Magaña Almaguer Hernán Daniel. Nació el día 30 de junio del año de 1970 en la ciudad de Mexicali, Baja California. Inicia sus estudios de Ingeniería Mecánica en el año de 1989 en el Instituto Tecnológico de Mexicali y obtuvo el título en el año de 1994, posteriormente en ese mismo año inicio sus estudios de Maestría en Ingeniería Termodinámica en el Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California (UABC), obteniendo el grado en 1996.

Y finalmente en el año 2011 inicia sus estudios de Doctorado en Ingeniería en la Especialidad de Sistemas Energéticos, en la UABC, obteniendo el grado en 2017.

Actualmente es el Jefe Departamento de Ingeniería Metal - Mecánica en el Instituto Tecnológico de Mexicali donde también es profesor de tiempo completo. Su área de interés es todo lo relacionado a los sistemas Energéticos y Termodinámicos, así como el ahorro y uso eficiente de la energía.

El Dr. Magaña-Almaguer es miembro del cuerpo académico con la línea de investigación "Reconocimiento de Patrones y Procesamiento Digital de Señales en Sistemas Térmicos", cuenta con autoría de múltiples artículos de revistas, también se ha desempeñado como líder de tres proyectos con financiamiento por el CONACYT en los años de 2015 al 2018.



Ramírez Moreno Francisco. Nació el día 28 de noviembre del año de 1955 en la ciudad de Celaya, Guanajuato. Inicia sus estudios de Ingeniería Industrial en el año de 1975 en la Universidad Autónoma del Estado de Morelos, en Cuernavaca, Morelos, México obteniendo el título en el año de 1980.

El actualmente es docente de tiempo completo del Departamento de Ingeniería Industrial en el Instituto Tecnológico de Mexicali. Su área de interés es todo lo relacionado a los procesos de manufactura.



Pando Jaime José Gabriel. Nació el día 30 de Enero del año de 1999 en la ciudad de Mexicali, Baja California, México. Inicia sus estudios de Ingeniería Mecatrónica en el año 2017 en el Instituto Tecnológico de Mexicali.

Actualmente es estudiante del tercer semestre de la carrera de Ingeniería Mecatrónica en el Instituto Tecnológico de Mexicali, en Mexicali, Baja California, México. Su área de interés es lo relacionado al ahorro de energía y la robótica.