

# Afectación de variables operativas en el consumo de combustible de una caldera

Gabriel Pando, Pedro Mayorga, Hernán Magaña, Sebastian Velarde y Alejandro Pelaez

Metal-Mecánica

Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Mexicali,

Mexicali, B. C.; México

[pando, maganahernan]@itmexicali.edu.mx, [pmogauss, sevas42] @gmail.com, alexpelaez@hotmail.com

**Abstract**— The aims of this work is to determinate the impact of air excess, the temperature of chimney, the input water temperature, the operation pressure, even the month which the boiler was running, all this in function of the fuel consumption, furthermore boiler performance. To reach this goal, several simulations to determine the optimal conditions was done. From the results, it was concluded that optimal conditions can reach, when the fuel consumption effect over the steam generation is known.

**Keyword**— *Boilers, Energy saving, Fuel consumption.*

**Resumen**— En este trabajo se presenta un estudio que permitió determinar la afectación del exceso de aire, la temperatura de la chimenea, la temperatura del agua de alimentación, la presión de operación, inclusive el mes en el cual operaba la caldera en el consumo de combustible y por ende en la eficiencia de la caldera. Para lograr esto, se realizaron varias simulaciones para determinar las condiciones óptimas de funcionamiento. De los resultados se concluyó que es posible operar la caldera en condiciones óptimas, al conocer cómo afectan las condiciones de operación el consumo de combustible en la generación de vapor.

**Palabras claves**— *Calderas, Ahorro de energía, Consumo combustible.*

## I. INTRODUCCIÓN

Existen varios autores que han realizado investigaciones tendientes a determinar la eficiencia de las calderas. Li y colaboradores determinaron que existe una disminución en el rendimiento de la caldera al incrementar el exceso de aire, asimismo, encontraron que existe una disminución en la transferencia de calor por radiación por el mismo fenómeno [1]. Armijo y salas analizaron el efecto del precalentamiento del agua en la eficiencia de una caldera, encontrando ahorros en el consumo de combustible del orden del 5% al incrementarse la temperatura del agua de alimentación [2]. Por lo tanto, es necesario un trabajo más exhaustivo, y efectuar análisis más completos, i.e., con un conjunto mayor de variables que repercuten en la eficiencia de operación de las calderas.

La eficiencia de la caldera, que básicamente representa una relación entre la cantidad de calor absorbido por el agua para cambiar su fase de líquido a vapor y la cantidad de calor liberado por el combustible en el quemador, tiene una repercusión económica importante en la producción de vapor, ya que está prácticamente funciona durante todo el año y tan solo un incremento de dos o más puntos porcentuales generan un ahorro considerable de combustible anualmente, además, y aunque no es producto de esta investigación al reducirse la cantidad de combustible quemado se tiene un impacto favorable en el medio ambiente ya que también se reducen las emisiones contaminantes derivadas por la quema del combustible utilizado en la generación del vapor.

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

Las calderas tienen diferentes variables de funcionamiento que dependen del combustible utilizado en ellas. Algunas de estas variables son: generación de vapor, presión de operación, presión de vapor para

precalentar el combustible (en caso de requerirse), presión de atomización, temperatura de los gases de combustión, temperatura ambiental, temperatura de entrada de agua a la caldera y exceso de aire. Sin embargo, esta investigación, se centra, en cómo afecta el consumo de combustible y por ende la eficiencia de la caldera al modificar algunas variables, como lo son: el exceso de aire, la temperatura de los gases de combustión en la chimenea, la temperatura del agua de alimentación, la presión de operación y la temporada en la cual opera la caldera, para ello se utilizó el software FRF (Feasibility Replacement Fuel) propuesto por Pando et al, el cual incorpora una serie de variables operacionales de las cuales existe una medición para determinar el combustible óptimo para la generación del vapor [4].

El artículo está estructurado de la siguiente manera: En la primera parte se presenta una breve descripción del sistema de generación de vapor, posteriormente se muestra la metodología utilizada en la investigación, donde se realiza una breve explicación del software utilizado para la generación de los resultados, a continuación se muestran los resultados obtenidos al variar el exceso de aire para la combustión, la temperatura de los gases de combustión en la chimenea, la temperatura del agua de alimentación a la caldera, la presión de operación de la misma así como la influencia de las condiciones climatológicas y a la postre las conclusiones derivadas de esta investigación.

Por lo antes mencionado, el presente trabajo se enfoca al análisis de diversas variables, que al ser modificadas presentan una variación en la eficiencia y consumo de combustible en una caldera, de manera tal que, se puede conocer la repercusión de estas en el consumo de combustible.

## II. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

Los sistemas de generación de vapor pueden diferir de una planta a otra sin embargo, de manera general, la mayoría cuentan básicamente con lo mostrado en la figura 1. En este esquema, el tanque de condensado recibe agua suave fría generalmente proveniente de los suavizadores y condensado caliente proveniente en su gran mayoría del proceso, por lo cual la temperatura del tanque de condensados y por ende del agua de alimentación a la caldera básicamente depende de la cantidad de retorno de condensado que se tenga (si es que no se calienta a través de un medio adicional, por ejemplo vapor), esta agua es inyectada a la caldera por medio de una bomba de agua. En la caldera esta agua pasará de líquido subenfriado o comprimido a vapor saturado al recibir calor proveniente de la reacción de combustión entre el combustible y el aire, para ello generalmente se inyecta una cantidad de aire por encima del estequiométrico para asegurar una completa combustión y que no existan inquemados, por lo que a la salida de la caldera se tiene por una parte el vapor generado, gases de combustión con una temperatura por encima de la temperatura del vapor generado (gases calientes) y purgas que mantienen básicamente la caldera libre de lodos y con los sólidos totales disueltos en el rango deseado, obviamente también se tienen pérdidas por convección y radiación que no se muestran en el esquema y que oscilan entre el 0.5% y el 2% [5].

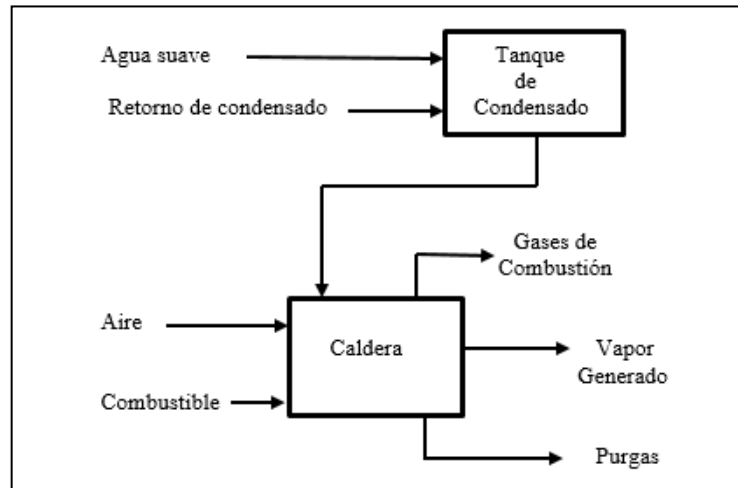


Fig. 1. Esquema general de un sistema de generación de vapor.

### III. METODOLOGÍA

El consumo de combustible en una caldera está influenciado por diversos factores como: el poder calorífico del combustible, la generación de vapor, la presión de operación, la temperatura de los gases de combustión, la temperatura ambiental, la temperatura de entrada de agua a la caldera y el exceso de aire entre otros, algunos contribuyen en mayor o menor medida en el consumo de combustible, por lo que en la presente investigación se determinarán los porcentajes de contribución al consumo de combustible y eficiencia de la caldera del exceso de aire, la temperatura de los gases de combustión a la salida de la chimenea, la temperatura del agua de alimentación, la presión de operación y el mes en el cual se encuentra la caldera en funcionamiento.

El modelo utilizado en la presente investigación fue el propuesto por Pando et al, a través del software FRF (Feasibility Replacement Fuel), el cual fue desarrollado para determinar el combustible óptimo a utilizarse en la generación de vapor considerando únicamente como combustibles el combustóleo y el gas natural, sin embargo, también se puede utilizar para encontrar las condiciones óptimas de funcionamiento, las cuales redundarían en una mejor operación de la caldera, ya que considera para el cálculo del consumo de combustible una serie de variables que son las que a juicio propio contribuyen en el consumo de combustible, y, dado que nuestro objetivo es determinar los efectos que tiene el exceso de aire, la temperatura en la chimenea, la temperatura del agua de alimentación, la presión de operación y el mes de operación, en los consumos de combustible y por ende en la eficiencia de la caldera.

Se realizaron varias simulaciones utilizando el software FRF a fin de encontrar el porcentaje de contribución de las variables mencionadas anteriormente en la eficiencia y al consumo de combustible de la caldera, por lo que, salvo que se especifique lo contrario, los valores solicitados por el software serán los descritos en la tabla I, mismos que generalmente se encuentran en las bitácoras de operación de la caldera.

Tabla I. Valores de entrada al utilizar el software FRF.

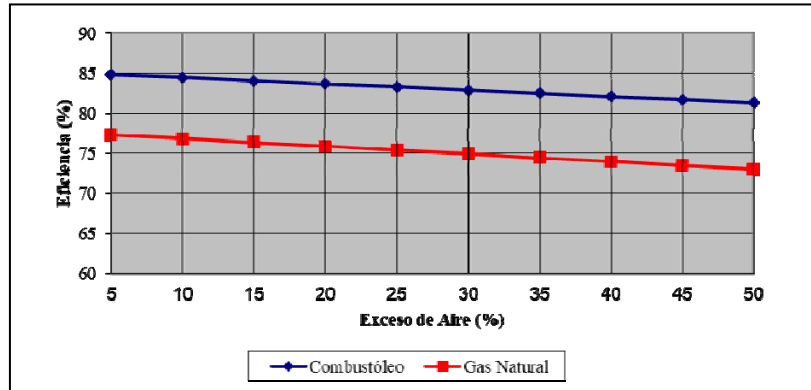
Descripción	Valor	Unidades
Mes	Enero	Adimensional
Presión de operación	1310	kPa
Generación de vapor en el mes	14000000	kg
Días de operación de la caldera en el mes	31	Días
Temperatura de gases de combustión a la salida	300	°C
Temperatura ambiente	14.6	°C
Temperatura cuarto de calderas	20	°C
Velocidad del viento	8647	m/h
Temperatura agua de alimentación	105	°C
Temperatura del combustóleo en intercambiador caldera	121	°C
Temperatura combustóleo en tanque de almacenamiento	48	°C
Presión de vapor al tanque de almacenamiento	207	kPa
Presión de sopleo	689.5	kPa
Número de sopleos al día	3	
Duración del sopleo	1	min
Presión de vapor al intercambiador caldera	413.7	kPa
Presión de vapor de atomización	689.5	kPa
Precio del combustóleo	6.3	\$/l
Razón de aditivo	0.0004	$l_{ad}/l_{comb}$
Precio aditivo	137.5	\$/l
Exceso de aire con combustóleo	20	%
Poder calorífico del combustóleo	45780	kJ/kg
Precio del gas natural	331.95	\$/Gcal
Factor de conversión	0.00904245	Adimensional
Exceso de aire con gas natural	10	%

#### IV. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

A continuación se muestran los resultados en el consumo de combustible y en algunos casos en la eficiencia para el caso de utilizar combustóleo o gas natural obtenidos al variar el exceso de aire para la combustión, la temperatura de los gases de combustión en la chimenea, la temperatura del agua de alimentación a la caldera, la presión de operación y el mes en el que se encuentre operando la caldera, asimismo se comparan los valores obtenidos en la eficiencia con los reportados en la literatura.

##### A. Exceso de aire

El exceso de aire varió del 5% al 50% en intervalos de 5%, los resultados obtenidos se pueden apreciar en las gráficas 1 y 2.

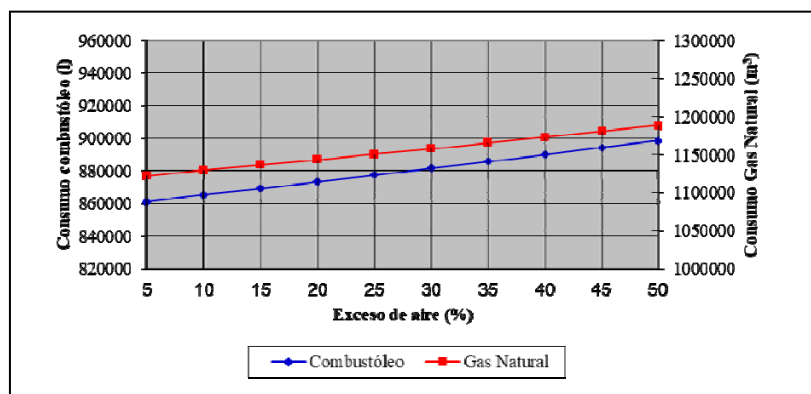


Gráfica 1. Eficiencia vs exceso de aire.

En la gráfica 1 se tiene una reducción de aproximadamente 1% en la eficiencia por cada 10% de incremento del exceso de aire contraponiéndose por lo dicho por la CONUEE donde expresa que existe un incremento del 1% en la eficiencia por cada 15% de reducción del exceso de aire, la misma CONUEE recomienda un exceso de aire entre 5% y 10% para el gas natural y del 10% al 15% para el combustóleo [6], por otra parte Plauchú redujo el exceso de aire del 65% al 15% obteniendo un incremento del 4% en la eficiencia, lo que representa un incremento del 1% en la eficiencia por cada 12.5% de reducción del exceso de aire [7].

En la gráfica 2 se tiene un incremento del 0.9% para el combustóleo y 1.2% para el gas natural en el consumo de combustible por cada 10% de incremento en el exceso de aire concordando con Oelker que señal que se tiene un 1% de aumento en el consumo de combustible por cada 10% de aumento en el exceso de aire [8].

En ambos casos este incremento se debe principalmente a que al incrementar el exceso de aire se aumenta la cantidad de masa de aire existente en el proceso de combustión, misma que se debe llevar hasta la temperatura de combustión, necesitando para ello más energía, que es tomada de la energía liberada por el combustible, sin embargo, para el caso del gas natural se tiene un mayor incremento debido a la diferencia de los poderes caloríficos del combustible que es mayor para el caso del combustóleo.

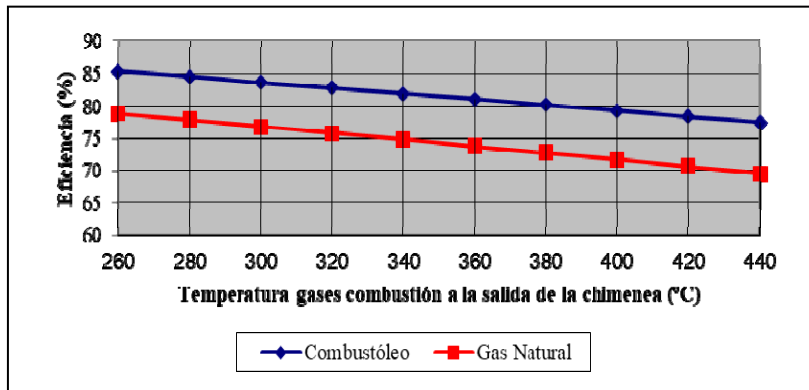


Gráfica 2. Consumo de combustible vs exceso de aire.

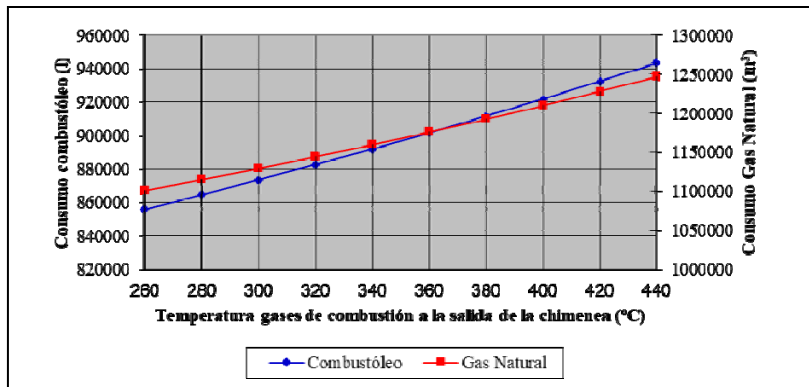
*B. Temperatura de los gases de combustión en la chimenea*

La temperatura de los gases de combustión a la salida de la chimenea varió de 260 a 440°C en intervalos de 20°C.

Plauchú expresa que se puede incrementar la eficiencia en un punto porcentual por cada reducción de 22°C en la temperatura de los gases en la chimenea [7], en la gráfica 3 se obtuvo un incremento de 0.9% por cada 20°C de incremento en la temperatura de los gases de combustión en la chimenea, y en la gráfica 4 se tiene un incremento en el consumo de combustible del 1% para el combustóleo y 1.2% para el gas natural por los primeros 20°C de incremento en la temperatura de los gases de combustión y este se incrementa en aproximadamente 0.02% por cada 20°C subsecuentes. Este incremento en el consumo del combustible y por ende una disminución en la eficiencia se debe a que al salir los gases de combustión más calientes aportando la misma cantidad de energía al agua para generar el vapor, llevan consigo más energía, misma que fue suministrada por el combustible.



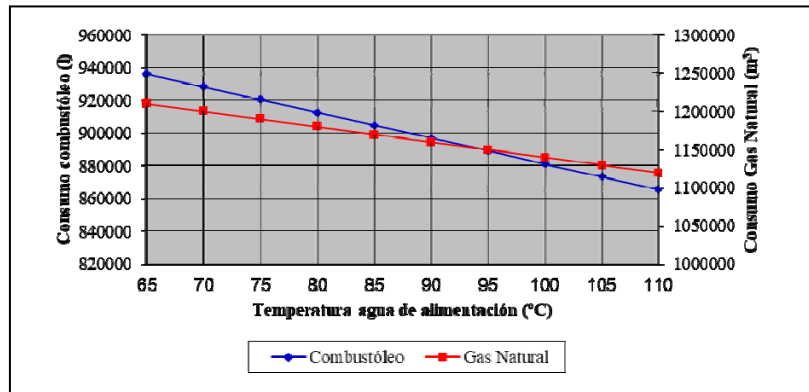
Gráfica 3. Eficiencia vs temperatura gases de combustión en chimenea.



Gráfica 4. Consumo de combustible vs temperatura gases de combustión en chimenea.

### C. Temperatura del agua de alimentación

La temperatura del agua de alimentación juega un papel muy importante en la operación de la caldera y no solo por el hecho de que al entrar a mayor temperatura se obtiene un menor consumo de combustible como se observa en la gráfica 5, donde se tiene una reducción en el consumo de combustible del 1.6% por cada 10°C de incremento en el agua de alimentación, sino que el principal beneficio es el cuidado de la caldera ya que no se le debe suministrar agua fría a la caldera caliente. Llanes y colaboradores encontraron una disminución de alrededor del 1.8% en el consumo de combustible por cada 10°C de incremento en la temperatura del agua de alimentación en una caldera piro-tubular alimentada con cáscara de arroz [9].

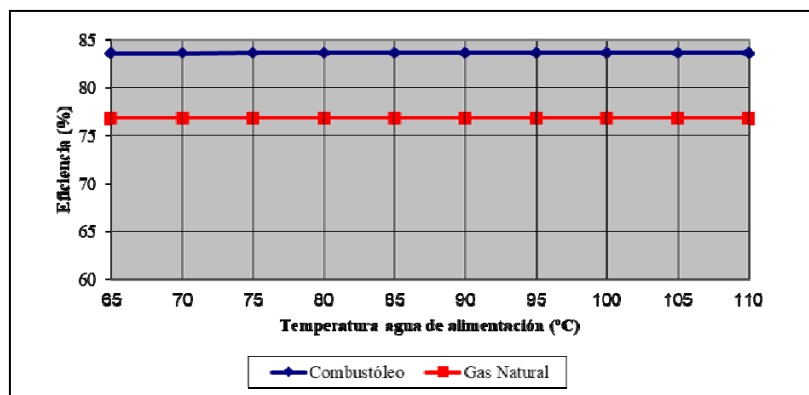


Gráfica 5. Consumo de combustible vs temperatura del agua de alimentación.

Se estima que por cada 6°C de incremento en la temperatura del agua de alimentación se obtiene un incremento del 1% en la eficiencia [7], sin embargo ese incremento está determinado por la instalación de un economizador, lo que sugiere que existe una disminución de la temperatura de los gases de combustión en la chimenea, y para el caso que nos ocupa ese incremento se lleva a cabo en el tanque de condensados y no en el economizador, por lo que para el cálculo no se está considerando la disminución a la que se hace referencia, por lo tanto, pudiéramos decir que al incrementar la temperatura en el agua de alimentación (no siendo esta en el economizador) no se obtiene un incremento en la eficiencia como se puede observar en la gráfica 6, sin embargo, si se obtiene un ahorro en el consumo de combustible debido a que existe una diferencia menor entre la entalpía del vapor a la salida de la caldera y la entalpía del agua al ingresar a la misma, ya que prácticamente se está disminuyendo la cantidad de calor sensible que se le tiene que suministrar al agua para llegar a la temperatura de saturación correspondiente a la presión de operación de la caldera. El hecho de que la eficiencia no se altere se debe a que al incrementar la temperatura se disminuye el combustible utilizado, pero se aumenta la entalpía del agua de alimentación, lo que hace que la eficiencia prácticamente no se altere. La eficiencia de la caldera es calculada con la ecuación 1.

$$\eta = w (h_v - h_a) / (cc * pc) \tag{1}$$

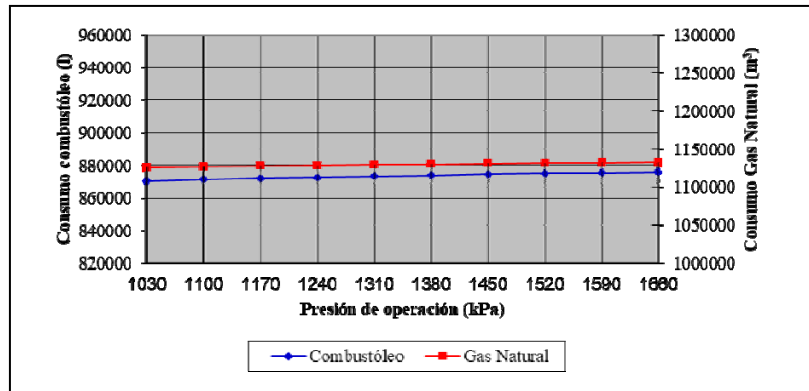
En la cual,  $\eta$  = Eficiencia,  $w$  = Vapor producido,  $h_v$  = Entalpía del vapor a la salida de la caldera,  $h_a$  = Entalpía del agua de alimentación,  $cc$  = Consumo de combustible,  $pc$  = Poder calorífico del combustible.



Gráfica 6. Eficiencia vs temperatura agua de alimentación.

*D. Presión de operación*

En la presente investigación varió la presión de operación de 1030 kPa a 1660 kPa en intervalos de 70 kPa (aprox. 10 lb/pulg<sup>2</sup>) encontrándose un incremento de menos del 0.1% en el consumo de combustible y este porcentaje disminuye entre mayor presión sea según se puede observar en la gráfica 7, donde se aprecia un ligero incremento en el consumo de combustible, lo anterior básicamente se debe que aunque la entalpía de vaporización es menor a presiones más elevadas, la diferencia entre la entalpía del líquido saturado correspondiente a la presión de operación y la entalpía del agua de alimentación a la entrada de la caldera es mayor que la diferencia de las entalpías de vaporización para un mismo incremento de presión.

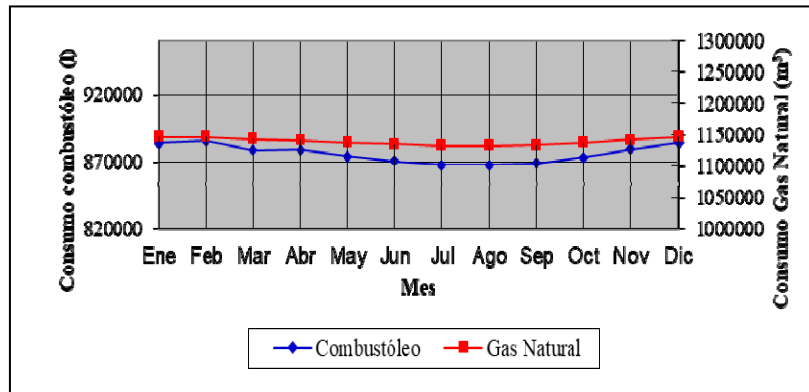


Gráfica 7. Consumo de combustible vs presión de operación.

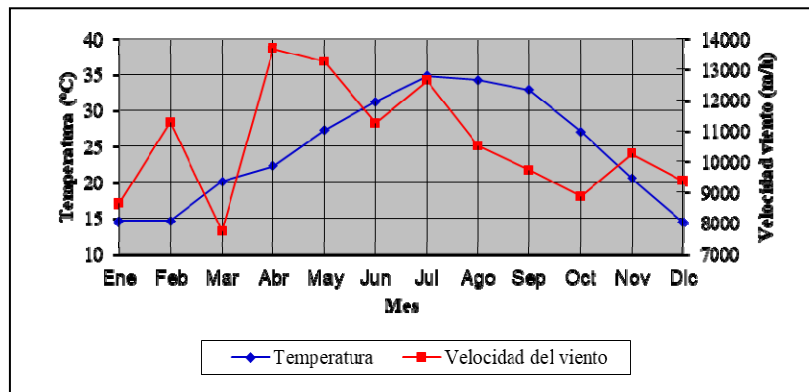
*E. Mes de operación*

La cantidad de combustible consumido para unas mismas condiciones de operación varía de mes a mes y de temporada a temporada como se puede ver en la gráfica 8 donde existe un incremento en el consumo de combustible del 2% para el combustóleo y 1.25% para el gas natural de la temporada de invierno a verano, esto se debe principalmente a la diferencia de la temperatura del medio ambiente y de las velocidades del viento como se puede observar en la gráfica 9, cabe señalar que para determinar el consumo de combustible se supuso una temperatura en el cuarto de calderas 1°C superior a la temperatura del medio ambiente para el mes evaluado, el hecho de que el gas natural tenga un menor incremento en el consumo de la temporada de invierno a verano se debe a que el gas natural no se ve afectado por la velocidad del viento, caso contrario al combustóleo el cual cuenta con un tanque de almacenamiento que si no se encuentra aislado las pérdidas de calor por convección son mayores al incrementarse la mayor velocidad del viento, y dado que se mantiene una temperatura del combustóleo constante en el tanque de almacenamiento, producto del calentamiento del mismo con vapor, si se tienen mayores pérdidas de calor se incrementa el consumo de vapor para mantener la temperatura del combustóleo en el tanque de almacenamiento. Es por ello, que el combustóleo se ve más afectado.





Gráfica 8. Consumo de combustible mensual.



Gráfica 9. Promedio mensual de temperatura y velocidad del viento.

## V. CONCLUSIONES

Existen diversas variables que contribuyen en mayor o menor medida al consumo de combustible y por ende en la eficiencia de una caldera, en la presente investigación se abordaron cinco de ellas que a juicio propio inciden en mayor medida para evaluar su impacto en el consumo de combustible encontrándose lo siguiente:

- Las condiciones ambientales tienen un impacto significativo en el consumo de combustible, sin embargo, no tenemos control sobre estas, pero, se pueden llevar a cabo acciones que disminuyan su impacto.
- Las principales variables operativas que se deben cuidar por su mayor impacto en el consumo de combustible son el exceso de aire, la temperatura de los gases de combustión en la chimenea y la temperatura del agua de alimentación.
- El exceso de aire debe estar de acuerdo al tipo de combustible y entre más bajo mejor, sin quedar en niveles tan bajos que puedan generar inquemados o CO.
- La temperatura de los gases en la chimenea entre más bajos mejor sin llegar a la temperatura del punto de rocío, esto cobra mayor importancia al utilizar combusóleo ya que los gases producto de la combustión son altamente corrosivos.
- La temperatura del agua de alimentación entre más alta mejor, teniendo cuidado de no causar problemas de cavitación en el equipo de bombeo.

- Se puede disminuir el consumo de combustóleo presentado en los meses de verano si se retira el calentamiento del combustóleo en el tanque de almacenamiento del mismo, ya que en estos meses no se requiere.
- Se recomienda evaluar técnica y económicamente todas las propuestas que pudieran surgir en busca de tener un mejor aprovechamiento del combustible.

## REFERENCIAS

- [1] Z. Li, Z. Miao, Y. Zhou, S. Wen, and J. Li, "Influence of increased primary air ratio on boiler performance in a 660 MW Brown coal boiler", *Energy*, 152, pp 804-817, June 2018. doi: 10.1016/j.energy.2018.04.001J. Clerk Maxwell, *A Treatise on Electricity and Magnetism*, 3rd ed., vol. 2. Oxford: Clarendon, 1892, pp.68-73.
- [2] J. Armijo, y G. Salas, "Ahorro de energía en una caldera utilizando economizadores", *Rev. Per. Quim. Ing. Quim*, Vol II, No. 1, pp 42-46, 2008.
- [3] M.C. Barma, R. Saidur, S.M.A. Rahman, A. Allouhi, B.A. Akash, and S.M. Sait, "A review on boilers energy use, energy savings, and emissions reductions", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79, pp. 970-983, November 2017. doi: 10.1016/j.rser.2017.05.187.
- [4] G.E. Pando Mtz, H.D. Magaña Almaguer, P. Mayorga Ortiz, M. Cervantes Astorga, "Methodology to determine the feasibility of replacement fuel in boiler", *ASTFE Digital Library*, pp. 539-547, 2017 [Proceedings of the 2nd Thermal and Fluid Engineering Conference, TFEC 2017. April 2-5, Las Vegas, NV, USA]. doi: 10.1615/TFEC2017.cbf.017514.
- [5] L. Jayamaha, *Energy-efficient building systems: Green strategies for operation and maintenance*, Mc Graw Hill Professional, 2006.
- [6] CONUEE, PyME, SENER, *Consejos para ahorrar energía en sistemas de vapor*. Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía. México, Octubre 2009.
- [7] A. Plauchú, *Eficiencia en calderas*, México, Primera Edición, 1995.
- [8] A. Oelker Behn, *Alternativas de ahorro en plantas térmicas*, Thermal Engineering Ltda. [http://www.thermal.cl/docs/articulos\\_tecnicos/articulo\\_\\_\\_alternativas\\_de\\_ahorro\\_en\\_plantas\\_te\\_\\_rmicas.pdf](http://www.thermal.cl/docs/articulos_tecnicos/articulo___alternativas_de_ahorro_en_plantas_te__rmicas.pdf) consultada el 19 de julio de 2018.
- [9] E.A. Llanes Cedeño, B. Sarria López, y E. López Bastida, "Influencia de la temperatura del agua de alimentación en el funcionamiento de la caldera pirotubular alimentada con cáscara de arroz para el proceso de precocido de arroz". *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*. Vol 15, No. 1. Pp. 57-62, 2006.