

DESARROLLO DE UN SOFTWARE PARA EL ANÁLISIS Y DISEÑO TÉRMICO DE CALDERAS PIROTUBULARES HORIZONTALES CON QUEMADORES A DIESEL Y BUNKER

Quiñónez, N.⁽¹⁾; Adum, V.⁽²⁾; Pindo, J.⁽³⁾

^(1,2,3)Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción,
Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL)
Campus Gustavo Galindo, Km. 30.5 vía Perimetral
Apartado 09-01-5863. Guayaquil-Ecuador
nicklee2001@hotmail.com; nquinone@espol.edu.ec

Resumen

El presente proyecto está enfocado en desarrollar un modelo que considere de una manera bastante cercana a la realidad los fenómenos implicados en el comportamiento térmico de las calderas pirotubulares horizontales para luego, incorporarlo en un software y determinar parámetros de salida que servirán para evaluar si un diseño en particular estará dentro de las condiciones normales de operación. El modelo planteado en este proyecto se inicia mediante un análisis termodinámico en el cual se establecerán cuales son los flujos de calor presentes tanto en el hogar de la caldera como en el haz de tubos. Una vez realizado el análisis termodinámico se procederá a realizar un análisis de transferencia de calor en toda la caldera, para obtener la cantidad de calor que se es capaz de transferir desde los productos de combustión a través del hogar y del haz de tubos hacia el agua que se encuentra en el exterior de los mismos. Dentro del análisis de transferencia de calor en el hogar de la caldera se empleará un método simplificado de la cámara de combustión (hogar) el cual considera una combustión no reactiva del combustible introduciendo una propiedad del mismo conocida como poder calorífico inferior (\overline{PC}_{inf}) con lo cual se asume que la energía de dicho combustible es liberada de manera instantánea al comienzo de la cámara de combustión. Tanto el análisis termodinámico como el de transferencia de calor se los realizó dividiendo el hogar y el haz de tubos en varias secciones (volúmenes de control) para que los valores de temperatura de los productos de combustión tengan una mejor aproximación. Con la aplicación del software Visual Basic 6.0 se creo una interfaz de usuario que hace más fácil su utilización y aplicación.

Palabras Claves: Análisis termodinámico, análisis de transferencia de calor, calderas pirotubulares horizontales, Visual Basic 6.0, volúmenes de control.

Abstract

The objective of this project is to develop a model which considers, from a quite near way to reality, the phenomena implied in the thermal behavior of firetube boilers for then, to incorporate them in software and to determine outcome parameters that will be useful to evaluate if a particular design falls into normal operating conditions. The model used in this project begins by means of a thermodynamic analysis in which it will set which one are the heat fluxes in the furnace of the boiler as well as in the tube bundle. Once carried out the thermodynamic analysis it will proceed to carry out an analysis of heat transfer in the whole boiler, to determinate the quantity of heat that the boiler is able to transfer from the combustion products through the furnace and through the tube bundle toward the water that is in the exterior of the same ones. Inside the analysis of heat transfer in the boiler furnace a simplified method of the combustion chamber (furnace) will be used which considers a non reactivate combustion of the fuel, introducing a property known as Low Heating Value (LHV)

with which, it can be assumed that the fuel energy is released in an instantaneous way at the beginning of the combustion chamber. The thermodynamic and heat transfer analysis were carried out dividing the furnace and the tube bundle in several sections (control volumes) so the values of the combustion products temperature have a better approach. With the application of the Visual Basic 6.0 software we did a user's interface that makes easier their use and application.

Introducción

El objetivo principal de este tema de tesis es el de desarrollar un software que pueda realizar de manera casi instantánea todos los cálculos iterativos necesarios para el análisis de este tipo de sistema térmico, convirtiéndose dicho software en una herramienta muy útil para el análisis y diseño de calderas pirotubulares horizontales, el cual a partir del ingreso de un grupo de datos de entrada sea capaz de proporcionar resultados que sean de utilidad para establecer si un diseño de caldera pirotubular determinado es correcto.

Una vez que se tiene el modelo, este será ingresado en un software el cuál tendrá que realizar los cálculos de una manera rápida. Dicho programa deberá de ser capaz de encontrar las soluciones de los valores de flujo de vapor de la caldera, distribución de la temperatura de los gases de combustión dentro de los tubos, eficiencia de operación de la caldera y temperatura de salida de los gases de combustión a partir de las variables de entrada como la geometría de la caldera, capacidad y tipo de combustible y presión de operación de la caldera. Para probar que el software proporciona resultados valederos, este será probado con diseños de calderas ya establecidos por marcas de constructores de caldera. Es decir, que los parámetros de operación de las calderas antes mencionadas deben de coincidir con

los que va a proporcionar el software en los diferentes cálculos.

Materiales y Métodos

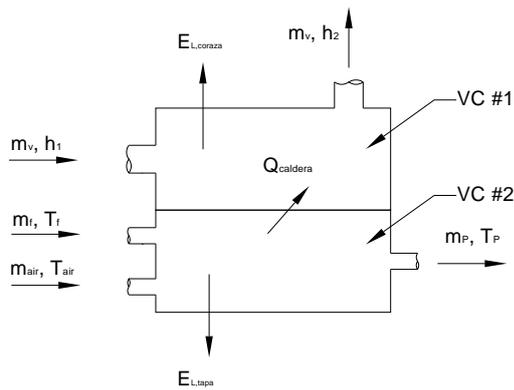
El desarrollo de este proyecto empieza con el análisis termodinámico de la caldera pirotubular horizontal para lo cual es importante indicar que aquí solo se tomó en cuenta de manera específica la termodinámica no reactiva de las calderas pirotubulares horizontales. Se dice no reactiva ya que no se entrará en detalles de energía de formación al analizar la reacción química del combustible (combustión).

Balance de energía de la caldera

Dentro de la caldera se puede diferenciar de manera bien marcada dos volúmenes de control, el lado de los gases de combustión y el del hogar. Para empezar el análisis se considero importante citar los siguientes supuestos que hacen válido dicho análisis.

- La caldera opera en estado estable.
- La pérdida de calor por las tapas afecta directamente al volumen de control del lado de los gases de combustión.
- La pérdida de calor por la coraza afecta directamente al volumen de control del lado del vapor.

A continuación se muestra de manera gráfica los dos volúmenes de control mencionados anteriormente.



Realizando los análisis respectivos en los diferentes volúmenes de control se puede llegar a desarrollar la ecuación que representa la energía necesaria para generar vapor a una tasa determinada, teniendo así:

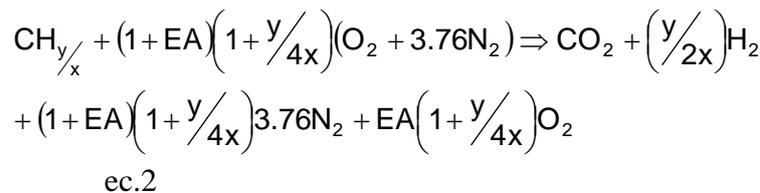
$$E_{\text{vapor}} = \dot{m} (h_{fg} @ P_{op}) \quad \text{ec.1}$$

Análisis termodinámico de la combustión en calderas pirotubulares

El análisis termodinámico de la combustión en una caldera pirotubular se basa prácticamente en la ecuación de combustión que se da en el hogar de la caldera por parte del combustible participante que para este caso en particular puede ser Diesel o Bunker. Para que la ecuación de combustión que se planteó tenga validez se debieron de citar los siguientes supuestos:

- Se asumirá que los combustibles estarán compuestos principalmente por carbono (C) y oxígeno (O).
- El exceso de aire que se tiene será el indicado para que exista combustión completa y no estará presente en demasía.

La ecuación de combustión que se genera es la que se muestra a continuación:



Donde: **EA** → Exceso de aire necesario para la combustión.

x, y → Toman valores diferentes dependiendo del tipo de combustible.

Es de suma importancia indicar que todas las propiedades de los productos de combustión estarán directamente relacionadas con la temperatura a la que se encuentren dichos productos de combustión.

Eficiencia y consumo de combustible

Tal como se había dicho anteriormente, el consumo de combustible era uno de los parámetros de entrada para el diseño térmico de calderas pirotubulares horizontales mientras que la eficiencia era una de los parámetros que nos permitía evaluar si la caldera estaba funcionando de manera normal o si algo estaba fuera de lo común. Para esto es importante definir cual será la eficiencia de una caldera, dicha eficiencia es calculada a partir de la siguiente ecuación:

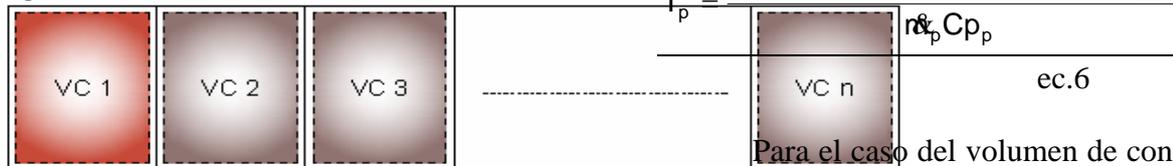
$$\eta_{\text{caldera}} = \frac{Q_{\text{agua}} - E_{L,\text{coraza}}}{\dot{m}_f PC_{\text{inf}}} \quad \text{ec.3}$$

La capacidad de generación de vapor (\dot{m}_f) se la puede obtener de la siguiente manera:

$$\dot{m}_f = \frac{Q_{\text{agua}} - E_{L,\text{coraza}}}{h_{fg} @ P_{op}} \quad \text{ec.4}$$

Análisis de transferencia de calor en el hogar de la caldera

Para el caso del análisis de transferencia de calor en el hogar, se cálculo el aporte de calor que proviene de la llama (radiación luminosa), así como de los productos de combustión (radiación no luminosa). Dicho análisis se lo realizó en secciones como se muestra en la siguiente figura:



Como se había indicado anteriormente, lo modelo plantea que la energía del combustible es liberada al principio del hogar (VC 1). La ecuación que determina la cantidad de calor que se transfiere al hogar es la siguiente:

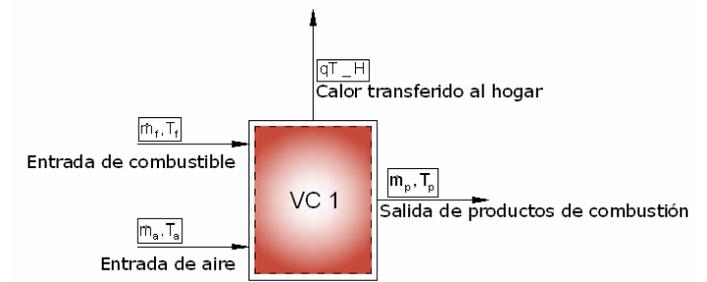
$$q_{T-H} = U_{out-H} A_{out} (T_g - T_{sat}) \quad \text{ec.5}$$

Donde: T_{sat} → Temperatura de saturación del agua a la presión de operación.

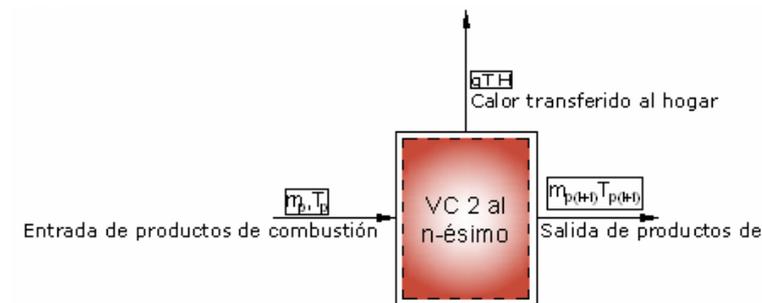
T_g → Temperatura promedio de gases de combustión (promedio entre la entrada y salida de productos de combustión).

Como es de suponerse, la temperatura a la salida de cada volumen de control será desconocida, sin embargo las propiedades de los productos de combustión están evaluadas @ T_g por lo que se empieza asumiendo el valor de temperatura de los productos de combustión a la salida del volumen de control (T_p), para luego de haber realizado el análisis de transferencia de calor lograr corregir dicho valor convirtiéndose así en un proceso totalmente iterativo.

Para el caso del volumen de control 1 la ecuación de corrección está dada por:



Para el caso del volumen de control 2 al n-ésimo, la ecuación de corrección será:



$$T_{p(i+1)} = \frac{\dot{m}_p C_{p_p} T_p - q_{T-H}}{\dot{m}_p C_{p_p}} \quad \text{ec.7}$$

Análisis de transferencia de calor en el haz de tubos de la caldera

Para el caso del análisis en el haz de tubos, se trabajo bajo la misma premisa de seccionar en varios volúmenes de control, para los cuales dicho análisis es similar al de los volúmenes de control 2 al n-ésimo en el hogar de la caldera y solo se trabajará con uno de los tubos del paso que se analiza. Luego dicho calor se lo multiplicará por el número total de tubos del paso. Este procedimiento se lo realiza para los diferentes pases que tenga la caldera.

Caída de presión en hogar y haz de tubos

La caída de presión dentro del hogar y del haz de tubos fue calculada mediante una ecuación muy conocida que

es la de Darcy-Weisbach la cual se muestra a continuación:

$$\Delta P_H = f \frac{\rho L_H V^2}{2D_{in_H}}$$

ec.8

Donde: L_H → Longitud del hogar.
 f → Factor de fricción.
 V → Velocidad de los gases de combustión.
 ΔP_H → Caída de presión dentro del hogar.

Implementación del software

El software que se utilizó como herramienta de solución de las ecuaciones utilizadas fue VISUAL BASIC. Con este software se realizó una ventana de interfaz con el usuario en la cual se muestran diferenciados los parámetros de entrada con los útiles para la determinación de si un diseño en particular es correcto o no. A continuación se muestra la ventana de presentación del software:



Resultados y Discusión

Como casos de análisis, el software se probó con diseños de calderas

pirotubulares horizontales existentes obtenidos de constructores de este tipo de equipos. A continuación se muestran dichos datos:

TABLA DE DATOS

DATOS	30 BHP	40BHP	125BHP
$L_{hogar} (m)$	1.38	2.455	2.88
$\phi_{in_hogar} (m)$	0.303	0.276	0.5419
$e_{hogar} (m)$	0.01	0.012	0.01905

<i>L_haz de tubos (m)</i>	1.38	2.455	2.88
ϕ_m <i>haz de tubos (m)</i>	0.03488	0.0456	0.0583
<i>e_hz de tubos (m)</i>	0.0026	0.0026	0.0026
<i># pasos</i>	2	4	4
<i>Turbuladores</i>	SI	NO	NO
<i>Ang. Turb.</i>	32 °	----	----
<i># tubos 2 paso</i>	71	18	40
<i># tubos 3 paso</i>	----	14	31
<i># tubos 4 paso</i>	----	12	27
ϕ_{out} <i>coraza (m)</i>	1	1.1	1.5
<i>e_coraza (m)</i>	0.012	0.012	0.012
<i>e_aislante (m)</i>	0.05	0.05	0.05
<i>e_forro (m)</i>	0.0007	0.0007	0.0007
<i>Tipo de aislante</i>	Lana de vidrio	Lana de vidrio	Lana de vidrio
<i>Consumo comb. (GPH)</i>	9	12	37.5
<i>Exeso de aire (%)</i>	20	20	20
<i>Presión operación (psi)</i>	125	125	150
<i>Tipo de combustible</i>	Diesel	Diesel	Diesel
<i>Ef. De ventilador (%)</i>	70	70	70

En la tabla siguiente se muestran los resultados obtenidos por el software para

cada una de las diferentes calderas que sirvieron para poner a prueba el programa.

TABLA DE RESULTADOS

<i>RESULTADOS</i>	<i>30BHP</i>	<i>40BHP</i>	<i>125BHP</i>
<i>Cap. Caldera (BHP)</i>	29.66	40.23	123.64
<i>Ef. Térmica (%)</i>	85.55	87.02	85.59
<i>Flujo de vapor (Lbm/h)</i>	1134.54	1538.69	479354
<i>Temp. gases chimenea (°C)</i>	252.4	221.13	251.16
<i>Temp. gases hogar (°C)</i>	976.13	895.28	1030.98
<i>Temp. vapor saturado (°C)</i>	174.16	174.16	181.04
<i>Perdida de calor coraza (W)</i>	1082.9	2112.08	3498.68
<i>Temp. sup. Coraza (°C)</i>	49.93	50.06	51.3
<i>Caída de presión hogar (Pa)</i>	1.804	8.399	2.913
<i>Caída de presión h. tubos (Pa)</i>	16.312	356.217	263.275
<i>Caída de presión total (Pa)</i>	18.116	364.616	266.188
<i>Potencia teórica (HP)</i>	0.0223	0.6102	1.381
<i>Potencia real ventilador (HP)</i>	0.0319	0.8718	1.9728

A continuación se muestra la apariencia que tiene la interfaz de usuario

cuando se ha corrido el programa con datos de la caldera de 125BHP.

Diseño Térmico de Calderas Piro-tubulares Horizontales

RESULTADOS ÚTILES PARA EL DISEÑO TÉRMICO		
Capacidad de Caldera	123.64	BHP
Eficiencia térmica	85.59	%
Flujo de vapor	4793.54	Lbm/h
Temp. salida de productos de combustión (CHIMENEA)	251.16	°C
Temp. salida de productos de combustión (HOGAR)	1030.98	°C
Temp. salida del vapor saturado	181.04	°C

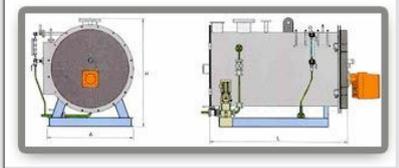
ESTIMACIÓN DE PÉRDIDAS DE CALOR EN CORAZA		
Pérdida de Calor a través de la coraza de la caldera	3504.44	W
Porcentaje referido a capacidad de caldera	0.289	%
Temperatura superficial del exterior de la coraza	51.18	°C

CAÍDA DE PRESIÓN EN HOGAR Y HAZ DE TUBOS		
Caída de presión en hogar	2.913	Pa
Caída de presión en haz de tubos	263.275	Pa
Caída de presión total de los gases de combustión	266.188	Pa
Potencia teórica requerida	1.381	HP
Potencia real requerida	1.9728	HP

GEOMETRÍA DE LA CALDERA		
HOGAR		
Longitud (L)	2.88	m
Diámetro Interior	0.5419	m
Espesor Pared	0.01905	m
HAZ DE TUBOS		
Longitud (L)	2.88	m
Diámetro Interior	0.0583	m
Espesor Pared	0.0026	m
¿Turbuladores?	No	
Ángulo de paso en turbuladores		
Número de pasos	4	
Cantidad de tubos en segundo paso	40	
Cantidad de tubos en tercer paso	31	
Cantidad de tubos en cuarto paso	27	
CORAZA, AISLANTE Y FORRO		
Diámetro exterior de coraza	1.5	m
Espesor de coraza	0.012	m
Espesor de aislante	0.05	m
Espesor de forro	0.007	m
Tipo de aislante	Lana de vidrio	

CONDICIONES DE OPERACIÓN Y TIPO DE COMBUSTIBLE		
Consumo de Combustible	37.5	GPH
Exceso de Aire	20	%
Presión Operación	150	psi
Combustible	Diesel	
Eficiencia del ventilador	70	%

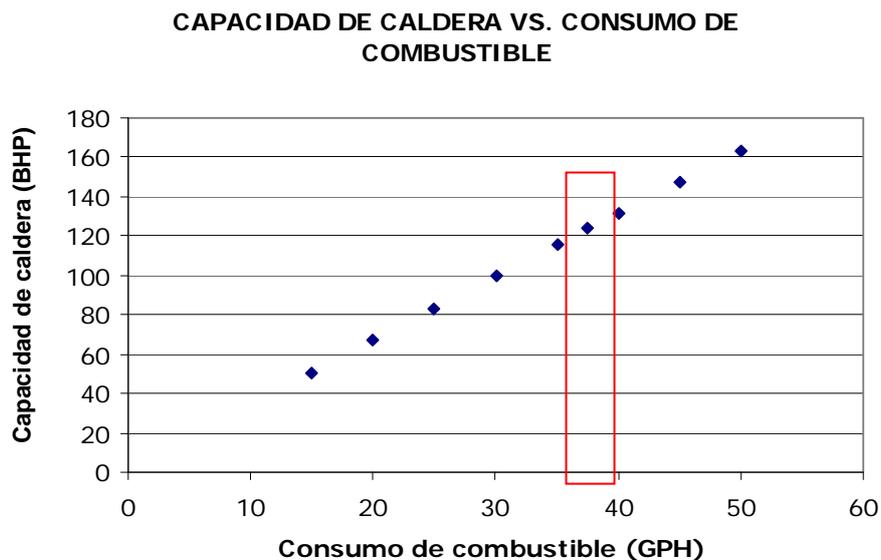




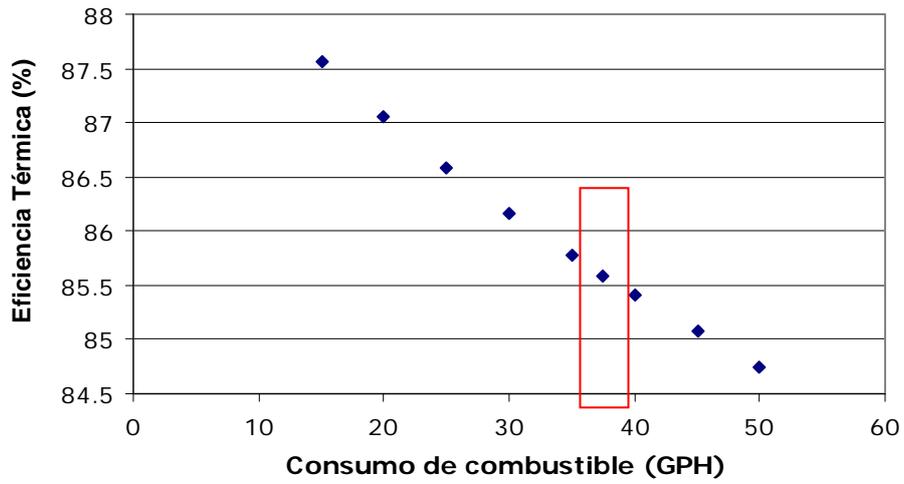
ANALIZAR **SALIR**

Como una manera de analizar mejor los resultados obtenidos por el software se generaron diferentes gráficas con datos obtenidos del software para una caldera de

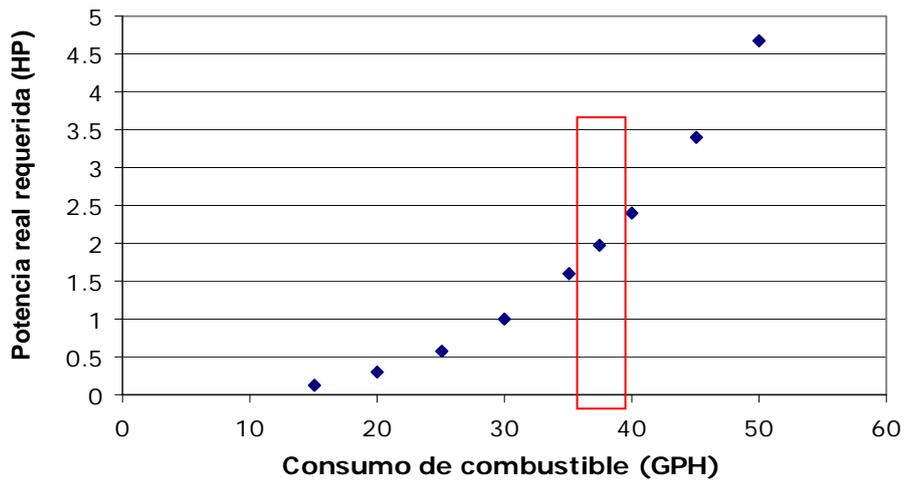
125BHP las cuales se muestran a continuación:



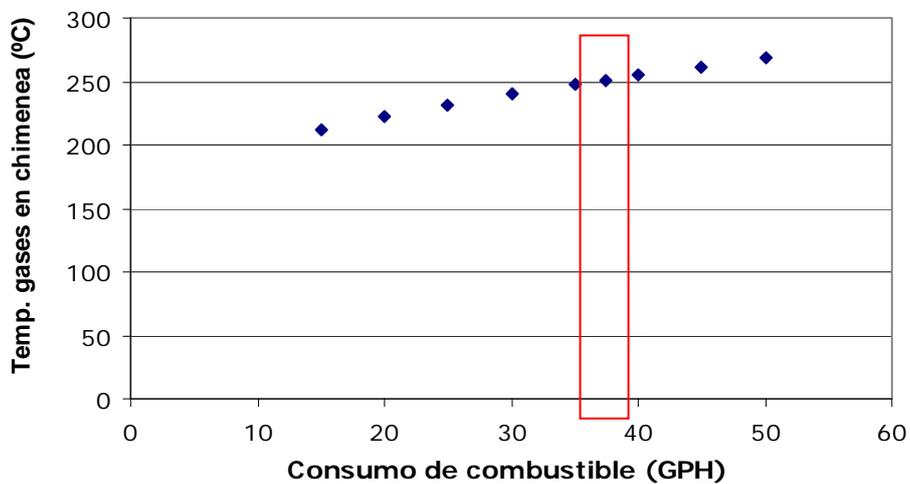
CAPACIDAD DE CALDERA VS. EFICIENCIA TÉRMICA



CAPACIDAD DE CALDERA VS. POTENCIA REAL REQUERIDA



CAPACIDAD DE CALDERA VS. TEMP. GASES EN CHIMENEA



Para las gráficas antes mostradas el punto de operación se encuentra en 37.5 GPH, de consumo de combustible que se lo representa con el recuadro rojo por lo que gráficamente se puede interpretar lo siguiente:

Si se decide trabajar con un quemador de menor capacidad para la distribución de tubos planteada, va a ocurrir que la capacidad calculada puede ser aproximada a la de una caldera más pequeña, pero sin embargo dicha capacidad de caldera se la puede obtener con una geometría más pequeña de dicha caldera obteniendo parámetros de análisis correctos siendo innecesario e incorrecto una geometría muy grande, por otro lado si se desea trabajar con un quemador mucho más grande va a ocurrir que la eficiencia de la caldera disminuirá y la caída de presión se incrementará considerablemente convirtiéndose en impracticable la geometría de caldera planteada.

Conclusiones

Para determinar si una caldera pirotubular horizontal se encuentra bien diseñada o si se encuentra en correcto funcionamiento se deben tener en cuenta los siguientes parámetros de operación:

- Eficiencia térmica: 85% - 88%
- Temperatura de gases de combustión en chimenea: No mayor a 255°C.
- Temperatura de gases de combustión en hogar: Aproximadamente 1000°C.
- Potencia requerida para ventilador.

Observando los resultados obtenidos por el software podemos notar que para todos los casos dichos parámetros están dentro de los rangos antes mencionados llegando así a la conclusión de que el software está proporcionando resultados correctos pudiendo así utilizarlo para diseñar la caldera que el usuario crea

conveniente. Para esto es importante verificar que la potencia del ventilador que resulte para un diseño en particular no sea demasiado elevada con respecto al tamaño de la caldera.

La aplicación del software en el análisis y diseño térmico de calderas pirotubulares horizontales es de suma importancia como se pudo notar, ya que para un solo análisis se deben de realizar una cantidad de cálculos iterativos que realizarlos manualmente resultarían imprácticos. Los datos de las gráficas antes generadas fueron obtenidos del software al cual con solo variar el valor del consumo de combustible calculaba de manera instantánea los demás parámetros para realizar dichas gráficas. Como se puede apreciar, el software está desarrollado de tal manera de que el usuario pueda manejarlo sin mayor complicación tanto en el ingreso de datos como de la obtención de los resultados. El software ayudará a optimizar térmica, económica y ecológicamente este tipo de sistema térmico ya que al variar el parámetro que el usuario desee, en cuestiones de segundos obtendrá datos que deberán estar dentro de los parámetros de operación para dar como correcto un diseño en particular.

Agradecimientos

La realización de este proyecto no hubiese sido posible sin la importante ayuda en la parte teórica de parte del Ing. Vicente Adum G. quien con su amplio conocimiento en el tema proporcionó la bibliografía necesaria quien también fue un guía durante el desarrollo del proyecto. Para la parte de programación le agradezco al Ing. Juan Carlos Pindo quien con sus conocimientos en el lenguaje de programación utilizado fueron de invaluable ayuda para la elaboración del software. Gracias a las dos personas antes mencionadas este proyecto logro obtener

los alcances que se esperaban llegando a cumplir con los objetivos propuestos inicialmente.

Bibliografía

1. Incropera Frank P. y De Witt David P., “Fundamentos de Transferencia de Calor”, Prentice Hall, México, Cuarta edición, 1999.
2. Modest Michael F., “Radiative Heat Transfer”, McGraw Hill, United State of America, 1993.
3. Basu Prabir, Kefa Cen and Jestin Louis, “Boilers and Burners (Design and theory)”, Springer, United State of America, 1999.
4. Cengel Yunus A. y Boles Michael A., “Termodinámica”, McGraw Hill, México, Cuarta edición, 2002.
5. Munson, Young y Okiishi, “Fundamentos de Mecánica de Fluidos”, Limusa Wiley, México, Segunda edición, 2003.
6. Villavicencio H., “Programación en Visual Basic, la mejor herramienta”, Jasalsa Editores, Guayaquil, Ecuador, 2002.
7. Ceballos Sierra F., “Microsoft Visual Basic: aplicaciones para Windows”, Ra-Ma, Addison-Wesley Iberoamericana, Madrid, España, 1992.
8. www.msdn.com, Guía de referencia del usuario en línea para Visual Basic.