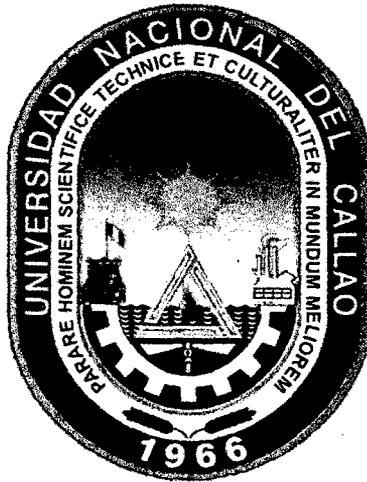


1110
Manuel
09/09/2015
15:00h.
281.

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN DE LA FACULTAD DE
INGENIERÍA QUÍMICA



R E C I B I D O	UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO
	VICE-RECTORADO DE INVESTIGACIÓN
	210 15 SEP 2015
	HORA: 15:20
	FIRMA: <i>[Signature]</i>

INFORME FINAL DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN
“BALANCE TÉRMICO EN UNA CALDERA
PIROTUBULAR”

AUTOR: ALBERTO EMILIO PANANA GIRIO

Periodo de Ejecución: Del 01-10-2013 al 30-09-2015

Resolución de aprobación Nº 977 – 13- R

Callao, 2015

I	INDICE	Pág.	1
II	RESUMEN Y ABSTRACT		6
III	INTRODUCCIÓN		8
	3.1 Exposición del tema de investigación		8
	3.2 Objetivos		10
	3.2.1 Objetivos General		10
	3.2.2 Objetivos Específicos		10
	3.3 Alcance		10
	3.4 Tipo de investigación		11
	3.5 Importancia de la Investigación		11
	3.6 Justificación de la investigación		13
IV	MARCO TEORICO		14
	4.1 Antecedentes		14
	4.2 Calderas		15
	4.3 Clasificación de las calderas		17
	4.4 Características principales de calderas piro tubulares		18
	4.5 Características principales de calderas acuo tubulares		20
	4.6 Especificaciones Técnicas de una caldera piro tubular		22
	4.6.1 Capacidad		22
	4.6.2 Masa nominal de vapor, m_{es} como /h)		24
	4.6.3 Superficie de calefacción, (SC)		24
	4.6.4 Coeficiente de evaporación, C_e , (kg/h.m ²)		24
	4.7 Balance de energía en una caldera		25



4.8	Calor entrante	26
4.9	Calor saliente	30
V	MATERIALES Y MÉTODOS	39
5.1	Flujos	39
5.1.1	Flujo de aire	39
5.1.2	Consumo de electricidad	39
5.1.3	Consumo de vapor	39
5.1.4	Masa de gases de escape	40
5.1.5	Perdida de calor al ambiente Masa de gases de escape	40
5.1.6	Otros datos, se obtienen por los equipos de medición de la caldera.	40
5.1.7	La composición gravimétrica real del combustible	40
5.2	Instrumentación empleados	40
5.3	Método de cálculo para la realización de los balances	41
5.3.1	Medición de las variables	42
5.3.2	Flujo de Combustible (puede ser diesel, gas o residual)	42
5.4	Balances a realizarse en la caldera para el análisis energético.	43
5.4.1	Balance de masa	43
5.4.2	Balance energético	43
5.4.3	Determinación del rendimiento energético	44
5.4.4	Medidas para mejorar la eficiencia de una caldera piro tubular.	44
VI.	RESULTADOS	53
6.1	Condiciones de la caldera piro tubular, para el cálculo del	



Balance térmico. Por lo cual se tienen el siguiente dato;	53
6.2 Cálculo del calor útil entregado al vapor de descarga de la caldera, $Q_v = \text{kcal/kg combustible}$ -	54
6.3 Cálculo de los las energías perdidas	
6.3.1 Cálculo del calor perdido al ambiente por el aire seco en la chimenea, ($Q_g = \text{kcal/kg comb.}$)	55
6.3.2 Cálculo del calor perdido por humedad del aire de entrada al hogar, Q_{HA} (kcal/kg comb.)	57
6.3.3 Cálculo del calor perdido por la humedad contenido en el Combustible.	58
6.3.4 Cálculo del calor perdido por la combustión incompleta, $Q_{ci} = \text{kcal/ kg comb}$	59
6.3.5 Cálculo del calor perdido al ambiente por convección y Radiación (Q_{cr}), (kcal/kg comb)	60
6.3.6 Rendimiento de la caldera, (η), por el método directo, Llamado también rendimiento bruto	61.
6.3.7 Cálculo de los BPH de la caldera	61
6.3.8 Superficie calentamiento. ($A = \text{m}^2$)	61
6.4 mediante la aplicación de la hoja de cálculo (Excel) se determina las variables para el balance térmico de la caldera piro tubular	62
VII. DISCUSIÓN	69
VIII. REFERENCIALES	70
IX. APENDICE	72



X. ANEXOS	75
A1. MATRIZ DE CONSISTENCIA	76
A2. Diagrama de Ostwald.	77
A3. Esquema de un medidor de opacidad	78
A4 Tabla N° 7.1 Lista de Mediciones y puntos donde se efectúan las mediciones y controles en una caldera piro tubular	79
A5 TABLA N° 7.2 Reacciones Químicas de combustión con su energía liberada (Poder Calorífico Superior)	81



RELACION DE FIGURAS

	Pág.
Figura N° 4.1 Caldera Piro tubular (tubos de humos)	20
Figura N° 4.2 Caldera acuo tubular con combustión central	21
Figura N° 4.3 Esquema para determinar la capacidad calorífica de una caldera	23
Figura N° 4.4 Cantidades energía que entran o salen de la caldera	26

RELACION DE TABLAS

Tabla N° 4.1 Clasificación de calderas piro tubulares	19
Tabla N° 4.2 Características de algunos tipos de calderas	25
Tabla N° 4.3 Poder Calorífico inferior o neto de combustibles	28
Tabla N° 4.4 Índice de Bacharrach, para medida de la opacidad de los humos	33
Tabla N° 4.5 Variación de las pérdidas de calor al ambiente con Relación a la masa del combustible	38
Tabla N° 4.6 Rendimiento de una caldera, según el tipo de caldera	38
Tabla N° 6.1 Resumen de los resultados obtenidos de los cálculos del balance térmico de la caldera piro tubular.	62
Tabla N° 7.1 Lista de Mediciones y puntos donde se efectúan las Mediciones y controles en una caldera piro tubular	80
TABLA N° 72 Reacciones Químicas de combustión con su Energía liberada (Poder Calorífico Superior)	81



II. RESUMEN Y ABSTRACT

RESUMEN

El presente trabajo de investigación, "Balance térmico en una caldera piro tubular", está enfocado a la realización de los cálculos de energías que ingresan, salen o que se pierden, es decir todas las energías implicados en el comportamiento térmico de la caldera, cuando está ha alcanzado su funcionamiento en estado estacionario. Para la contabilización de las energías se tiene en cuenta la ley de conservación de la energía.

Con el fin de alcanzar los objetivos y metas de esta investigación se plantea un método para el cálculo de las variables implicados en el balance térmico. Estas variables obtenidas servirán para la realización del dimensionamiento posterior de la caldera.

Con los datos considerados para la realización del balance térmico, se han obtenido los siguientes resultados:

Flujo de energía que ingresa, $He = 9902.55$ kcal/kg de combustible

Flujo energía útil, $Qv = 7653.08$ kcal/kg de combustible

Pérdidas de energías, $Qp = 2243.48$ kcal/kg de combustible.

BHP = 799

Rendimiento de la caldera, $\eta = 77\%$

Área de calentamiento, $A = 399.8$ m²

Con el fin de obtener estos parámetros se ha elaborado un programa en Excel, el cual puede ser aplicado en otras calderas que presenten diferentes condiciones.

PALABRAS CLAVES: Calderas piro tubulares, energía, característica del combustible, Rendimiento, gases de combustión, poder calorífico.



ABSTRACT

This research, "Thermal balance in a tubular furnace pyro", is focused on the calculations of energy entering, leaving or lost, ie all the energies involved in the thermal behavior of the boiler, when It is reached steady state operation. To the accounting for energy taken into account the law of conservation of energy.

In order to achieve the objectives and goals of this research a method for calculating the variables involved in the heat balance it arises. These variables obtained serve for carrying out the subsequent sizing of the boiler. With data considered for the realization of thermal balance, we have obtained the following results:

Energy flow entering, $I = 9902.55 \text{ kcal / kg fuel}$

Useful energy flow, $Q_v = 7653.08 \text{ kcal / kg fuel}$

Energy losses, $Q_p = 2243.48 \text{ kcal / kg fuel}$.

BHP = 799

Boiler efficiency, $\eta = 77\%$

Heating area, $A = 399.8 \text{ m}^2$

In order to obtain these parameters it has developed a program in Excel, which can be applied in other boilers having different conditions.

KEYWORDS: pyro tubular boilers, energy, fuel characteristic, Performance, flue gas calorific value.



III. INTRODUCCION

3.1 Exposición del problema de la investigación

El proyecto de investigación desarrollado, "Balance térmico en una caldera piro tubular", se debe a que las calderas equipos térmicos bastante empleadas como generadores de vapor de agua saturadas, y también con ciertos equipos adicionales se pueden obtener vapor sobrecalentado, de una u otra forma este vapor es utilizado como fluido de calentamiento en las diferentes industrias químicas, en las diversas secciones para la producción de sus productos químicos, dentro de estas industrias se tiene la del petróleo, papel, metalúrgica, cemento, fertilizante entre otros tipos de actividad industrial.

El presente trabajo se realiza los cálculos de balances térmicos a un tipo de caldera clasificada como piro tubular, donde la transferencia de calor que se realiza por conducción, convección y radiación de los gases calientes provenientes de la combustión del combustible que fluyen por el interior de los tubos, y se transfiere calor al agua que se encuentra por la parte exterior, primero hasta alcanzar la temperatura de ebullición y luego se produce el cambio de fase de líquido a vapor del agua

Dado la naturaleza del proceso, para la producción del vapor en la caldera, requieren un gran consumo de energía el cual se obtiene por el quemado del combustible, este puede ser sólido, líquido o gaseoso

.La combustión del combustible es importante conocer si esta se realiza perfectamente, por eso es importante determinar la composición de los gases productos, que por un lado es beneficioso para la generación del vapor de agua, debido a liberan gran cantidad de energía térmica por otro lado son nocivos tal como la presencia del monóxido de carbono (CO), que al desecharlo a la atmósfera produce contaminación del medio ambiente.



Este problema se puede minimizar en la medida que se utilice como combustible en estado gaseoso respecto a los combustibles líquido o sólido. Se puede utilizar también la energía eléctrica.

Con el fin de conocer el buen funcionamiento de la caldera, conocer el estado de los tubos sino presentan incrustaciones en sus paredes interna y externa, la cantidad de producción de vapor generado presenta la presión requerida, el rendimiento de la caldera es aceptable, entre otras variables, es lo que nos planteamos como problema. Estas variables son fundamentales en funcionamiento de la caldera, por lo que es necesario conocerlas, siendo este el motivo por lo que se plantea, la realización del Balance térmico de una caldera piro tubular.

Para la realización del balance térmico se ha desarrollado una metodología para la realización del balance térmico en una caldera piro tubular seleccionado, donde los resultados que se obtengan, como la capacidad de producción de vapor, la potencia de la caldera, el rendimiento, el análisis de los gases producto de combustión, caída de presión, permitirá analizarlos y comparar con los reportados por los fabricantes, de lo contrario se ha de plantear un plan de mantenimiento de la caldera y conseguir su buen funcionamiento..

Es necesario para el buen funcionamiento de la caldera, realizar en forma periódica el análisis del agua de caldera por los esta debe ser blanda por lo tanto requiere un tratamiento previo antes de alimentar a la caldera, puesto que esto puede traer consecuencias perjudiciales a la caldera, que se reflejan en los costos que puede producir

¿La metodología para la realización del balance térmico en la caldera piro tubular, será el más adecuado para la determinación las cantidades de calor involucrados en la caldera que opera en condiciones estacionaria?



3.2 OBJETIVOS

3.2.1 Objetivo General

Realizar el balance térmico en una caldera piro tubular

3.2.2 Objetivos específicos

Seleccionar la información necesaria que permitan realizar el balance térmico en una caldera piro tubular

Desarrollar un procedimiento de cálculo para el balance térmico en la caldera y determinar: la capacidad de la caldera, el rendimiento, producción de vapor de agua

Realizar un programa de cómputo para los cálculos de balance térmico en la caldera pirotubular del Laboratorio de Operaciones y procesos de la Facultas de Ingeniería Química – UNAC

3.3 Alcance

Con el desarrollo de este trabajo de investigación, Balance térmico en una caldera piro tubular, servirá como complemento, de los conocimiento adquiridos en el curso de Balance de Materia y Energía, de los estudiantes de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional del Callao, así como también a otros estudiantes afines de ingeniería, e inclusive a profesionales interesados en la formulación de balance de una caldera.



La caldera al cual se le realizará el balance térmico es de tubos horizontales, utiliza como combustible petróleo residual, se le determinará las condiciones de temperatura, presión, flujo del agua de alimentación, así como del agua de purga, el análisis de los gases producto de combustión.

3.4 Tipo de investigación

El proyecto de investigación, "Balance térmico en una caldera piro tubular es del tipo aplicada, correspondiente al área de ingeniería tecnológica. En el cual se aplicara el método descriptivo. De acuerdo con el código de la UNESCO"

3310 Tecnología Industrial

331001 Equipo Industrial.

3.5 Importancia de la investigación

El generador de vapor, como su nombre lo indica, tiene la función de producir vapor para sea utilizado en la generación de energía mecánica eléctrica y para la alimentación a equipos de proceso. Hoy en día este equipo es un elemento esencial en el funcionamiento de todas las empresas industriales.

Por ello se ha llegado a plantear que el generador de vapor es el corazón de toda industria moderna. Las empresas industriales necesitan energía para su funcionamiento, generalmente, en su forma primaria el calor, o como electricidad. De ahí que siempre se requiera la presencia de generadores de vapor para producir el vapor que suministrará el calor o que generará la energía eléctrica. En aquellos casos en que la industria prescindiera de tener sus propios equipos, tendrá que tomar energía eléctrica del sistema nacional, la que en casi



su totalidad es producida en centrales termoeléctricas con potentes generadores de vapor.

La energía para usos industriales tiene varias fuentes: la energía química de las sustancias combustibles, la energía potencial del agua acumulada en embalses, la energía atómica, la energía solar, la energía de las mareas y otras. Pero a pesar de existir diversas fuentes, la mayor parte se obtiene de la energía química

La investigación a realizar. "Balance térmico en una caldera piro tubular" es importante puesto que constituye un complemento de los conocimientos que se tiene sobre las calderas en general, Permite conocer antes de formular el balance todas las cantidades de energías que se encuentran involucradas en las corrientes de los fluidos que entran y salen de la caldera.

Se puede determinar también la producción de vapor, la potencia y eficiencia de la caldera.

Para realizar el balance térmico en una caldera piro tubular, se plantea una metodología para realización de los cálculos de las variables que se tiene que determinar, y con el objeto de simplificar y obtener los resultados en forma rápida y en menor tiempo se aplicara la hoja de cálculo exel, el cual servirá para la determinación del balance térmico, para otra caldera de diferentes condiciones.

El aporte de este trabajo de investigación es tecnológico y se puede ser tomado como ejemplo, para realizar el balance térmico de cualquier otro tipo de caldera en el cual se debe realizar su balance térmico.



3.6 Justificación de la investigación

Con este trabajo de investigación a realizar se determinará las diferentes cantidades de calor involucrados en el funcionamiento de las calderas, como la cantidad de calor que ingresan y salen con los fluidos, tales como el combustible, aire para la combustión, el agua líquida alimentada, vapor de agua producido, agua de purga, gases productos de combustión.

Para la determinación de estas cantidades permitirá aplicar los conocimientos que se tiene sobre balance de masa, balance de energía es decir, para conocer cada una de estas cantidades de calor se tiene que realizar el balance de masa, balance de en energía, conocimiento sobre los mecanismos de transferencia de calor, por lo que constituye un apoyo en el aprendizaje y formación de los estudiantes de la Facultad de Ingeniería Química de la UNAC, puesto que el campo de utilización de estos equipos térmicos es muy grande y de gran importancia a nivel industrial.

En este trabajo de balance térmico en una caldera piro tubular, se propone realizar previamente un método versátil para poder realizar los cálculos de balances correspondientes, se puede realizar mediante un programa computacional y poder realizar estos cálculos con rapidez respecto a los cálculos manuales



IV. MARCO TEÓRICO

Entre los estudios realizados sobre balance térmico en una caldera piro tubular, se tienen los siguientes trabajos:

4.1 Antecedentes

Omar Arturo Iguarán y Duarte, Diana Milena Martínez Barrios, "Diseño y construcción de una mini caldera piro tubular, para el Laboratorio de Transferencia de calor" de la Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, en este trabajo previamente al diseño y construcción realizan el balance térmico de esa mini caldera piro tubular, que generará una producción de vapor de 650 lb de vapor hora, utiliza un quemador para gas natural, de tiro forzado. La producción de vapor es para consumo del Laboratorio.

Andrade Juárez Gustavo, "Metodología para la evaluación de la eficiencia de calderas en el ingenio Cuatolapan". Tesis, para obtener el título de Ingeniero Mecánico Eléctrico. Donde las calderas que funcionan en el ingenio Cuatolapan no cuentan con un software para el cálculo del rendimiento de cada una de sus calderas, en las calderas queman tres tipos de combustibles, bagazo de caña, combustóleo y biomasa. Se pudo notar que no hay una cultura de quemar los diferentes combustibles, en particular, se observó un fogoneo constate en las calderas, a pesar de esto en la parte inferior de las calderas se forman un tipo de piedra que contiene mucho carbón lo que muestra que no se están quemando bien los combustibles. Se tomaron muestras de combustóleo y de bagazo de caña que muestran que Poder Calorífico Superior. Es necesario hacer un análisis sobre la eficiencia de la caldera para mejorar su combustión.



Raquel Calvo Sanz, "Modelado del sistema de caldera hrsg de un ciclo combinado con el simulador Ecosimpro y control del modelo", Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos, Ingeniería Industrial, tesis. El ciclo combinado es con el software Ecosimpro. Este software es una herramienta de simulación de sistemas mecánicos que consiste en la activación de variables de manera que satisfagan ciertos criterios de funcionamiento, permitiendo detectar los problemas que puedan surgir desde el inicio del proyecto hasta su finalización, pudiendo así valorar las diferentes alternativas, mejorar el diseño, la operación de la planta, etc. y así garantizar su óptimo funcionamiento. Por todo ello, este programa es de gran utilidad y abre un amplio abanico de posibilidades en los proyectos de Centrales Térmicas. Es muy importante que el Sistema de Caldera funcione correctamente. Así se suprimirán problemas que afecten al rendimiento de la central y que tendrían repercusiones económicas. Los componentes e instrumentos que conforman cada uno de los sistemas implicados han sido diseñados para trabajar bajo unas determinadas condiciones de temperatura, carga, caudal, presión, transferencia de calor entre el fluido y las paredes, etc. Si por circunstancias estas variables alcanzasen valores fuera de rango para el cual han sido diseñados sus componentes, estos se dañarían llegando incluso a romper, provocando el fallo del sistema, con este Simulador EcosimPro se puede adelantar a estos problemas

4.2 Calderas

En la actualidad las calderas forman parte de los equipos más utilizados por la industria y junto con los hornos industriales, son los responsables del mayor porcentaje de consumo de combustibles en este sector, por lo tanto, el mantenerlas trabajando con una buena eficiencia reditúa beneficios importantes para las empresas.



El término Caldera se aplica a un equipo industrial que sirve para producir vapor, se utiliza para mover una turbina, calentadores, como fluidos e calentamiento en los reactores químicos, para secar materiales, entre otras aplicaciones.

Las calderas generalmente son diseñadas para transmitir calor debido a la combustión de un combustible. (Sólido, líquido o gaseoso) a otro fluido que generalmente es el agua líquida que está dentro del equipo con las debidas medidas de seguridad.

El vapor o agua caliente, deben ser alimentados en las condiciones deseadas, es decir, de acuerdo con la presión, temperatura y calidad. También de acuerdo a la cantidad que se requiera. Por razones de economía, el calor debe ser generado y suministrado con un mínimo de pérdidas de calor. El vapor que se utiliza en los equipos de planta industrial se puede condensar y reutilizar, mezclando con el agua de alimentación de la caldera tratada

Funcionamiento

En las calderas, su funcionamiento radica en la transferencia de calor, producido por la combustión de un combustible al agua contenida o circulando dentro del recipiente metálico. En toda caldera se distinguen dos zonas importantes: la zona de liberación de energía y la zona de tubos.

a. Zona de liberación de calor

Llamada también hogar, cámara de combustión, es el lugar donde se quema el combustible. Esta zona puede estar en el interior o exterior de la caldera. En el interior, el hogar se encuentra dentro del recipiente metálico o rodeado de paredes refrigerado por agua.



En el exterior, el hogar es construido fuera del recipiente metálico y está parcialmente rodeado o sus paredes refrigerado por agua. La transferencia de calor en esta zona se realiza principalmente por Radiación, (llama – agua).

b. Zona de tubos

En esta zona los productos de combustión o gases calientes transfieren calor al agua principalmente por convección, y conducción. Esta zona está constituida por tubos dentro de los cuales pueden circular los gases calientes o el agua.

4.3 Clasificación de las calderas

Las calderas se pueden clasificar de diferentes formas, tal como de describe a continuación;

a. Según su movilidad

Fija o estacionaria

Móvil o portátil

b. Por la presión de trabajo

De baja presión, de 0 a 2,5 bar

Presión media de 2,5 a 10 bares

Alta presión entre 10 a 220 bares

Supercríticas calderas a más de 220 bar-

c. Según la generación

De agua caliente

De vapor - saturado (húmedo o seco), recalentado.



d. Según la circulación del agua dentro de la caldera

Circulación natural, el agua se mueve por efecto térmico

Circulación forzada, el agua se hace circular mediante bomba.

e. Según la circulación del agua y de los gases calientes

Piro tubulares o de tubos de humos

En estas calderas los gases calientes fluyen por dentro de los tubos cediendo calor al agua que se encuentra en la parte exterior de los tubos.

Acuo tubulares ó tubos de agua

El agua fluye por dentro de los tubos, captando calor de los gases calientes que fluyen por el exterior de los tubos. En estas calderas permiten grandes cantidades de vapor sobrecalentado a alta presión y alta temperatura, generalmente se usan en plantas térmicas para generar potencia mediante turbinas.

Es posible encontrar calderas mixtas, para bajas capacidades, calderas de tubos de humos y tubos de agua.

f. Según el tipo de combustible

Sólido, de carbón, biomas, etc.

Líquido, de fuel oíl, querosene, etc.

Gaseoso, Calderas de GLP, gas natural

4.4 Características principales de calderas piro tubulares

Generalmente es un recipiente metálico, comúnmente de acero. De forma cilíndrica o semicilíndrica, atravesados por un conjunto de tubos



por cuyo interior circulan los gases productos de combustión (gases calientes). Por problemas de resistencia de materiales, su tamaño es limitado. Sus dimensiones alcanzan a 5 m de diámetro y 10 m de largo. Generalmente se construyen para flujos máximos de 20 000 kg/h de vapor y las presiones de trabajo no superan los 18 bar.

Estas calderas pueden producir agua caliente o vapor saturado. En el primer caso se las instala un estanque de expansión que permite absorber las dilataciones del agua. En el caso de vapor saturado poseen un nivel de agua de 10 o 20 cm. Sobre los tubos superiores.

Entre sus principales características se pueden mencionar:

- a. Sencillez de construcción.
- b. Facilidad de inspección, reparación y limpieza.
- c. Son de gran peso.
- d. Su puesta en marcha es lenta.
- e. Presentan gran peligro en caso de explosión o ruptura debido al gran volumen de agua almacenada, en el siguiente Tabla N° 4.1, se presenta una clasificación de las calderas piro tubular.

Tabla N° 4.1
CLASIFICACION DE CALDERAS PIROTUBULARES

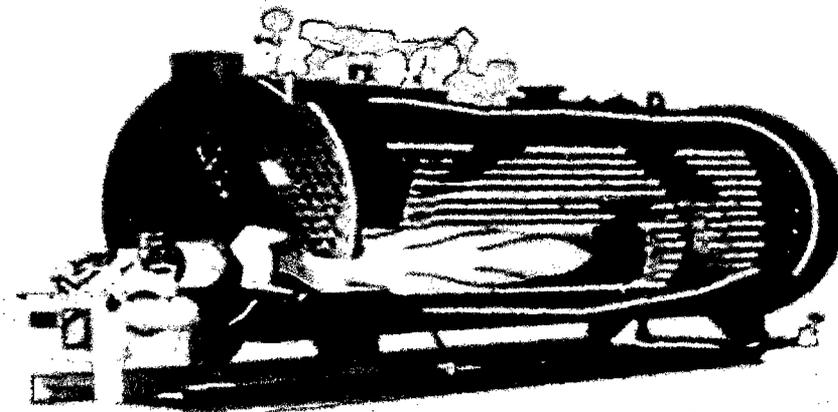
Horizontales	Estacionarias	Hogar Exterior	1 paso
		Hogar interior	2 pasos
	Móviles	Locomóvil	3 pasos
		locomotoras	4 pasos
Verticales	Tubulares		
	De tambores		

Fuente: Elaboración propia, Ing. Alberto Emilio Panana Giro, 2014



En el caso de calderas mixtas se les instala un banco de tubos recalentadores de vapor, ubicado en el hogar o muy cercano a él.

Figura N° 4.1
Caldera Piro tubular (tubos de humos)



Fuente: L.A. MOLINA y J.M ALONSO: "Calderas de Vapor en la Industria", Ed. Cadem - Eve, B

4.5 Características principales de calderas acuo tubulares

Estas calderas se componen de uno o más cilindros que almacenan el agua o vapor (colectores) unidos por tubos de pequeños diámetro por cuyo interior circula el agua. Estas calderas son usadas, cuando los requerimientos de vapor en cantidad y calidad son bastantes altos. Las calderas acuo tubulares, se construyen para capacidades mayores de 5 Ton/h (5 000 kg/h de vapor), con valores máximos en la actualidad de 2 000 Ton/h. permiten obtener vapor a temperaturas del orden de 550 °C y presiones de 200 bar o más. Las calderas acuo tubulares, debido a que utilizan tubos de menor diámetro:

Aceptan mayores presiones de trabajo.

Absorben mejor las dilataciones y son más seguras.

Su peso en relación a la capacidad es reducido.

Requieren poco tiempo de puesta en marcha.

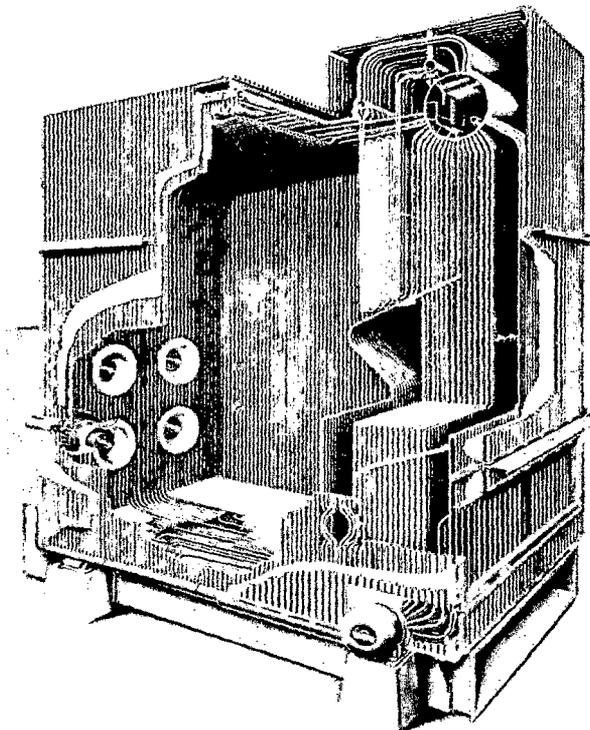
Son más eficientes.

No se construyen para bajas capacidades, debido a que su construcción es más compleja y las hacen más costosas con respecto a las calderas piro tubular.

Las calderas acuo tubulares se pueden clasificar en los siguientes tipos:

- a. Calderas de tubos rectos
- b. De tubos curvados con uno o más colectores
- c. Calderas acuo tubulares con circulación forzada.

Figura N° 4.2
Caldera acuo tubular con combustión central



Fuente: L.A. MOLINA y J.M ALONSO, Calderas de Vapor en la Industria,
Ediciones . Cadem - Eve B

4.6 Especificaciones Técnicas de una caldera piro tubular

4.6.1 Capacidad

La capacidad de una caldera, es una de las especificaciones técnicas más importantes, se determina en base a la capacidad de calor que es absorbido por el agua mediante los mecanismos de transferencia de calor de los productos de combustión, que se generan al quemar un combustible, (gases calientes).

La capacidad se puede expresar de las siguientes formas:

a. Capacidad calórica , Q (KJ/h)

Viene a ser la cantidad de calor que recibe el agua en la caldera, considerando que el rendimiento es máximo. En realidad es un flujo de calor, que se puede expresar también en las siguientes unidades: kW, MW, BTU/h.

Se calcula realizando un ensayo térmico a la caldera, para lo cual se mide el consumo real de agua, o la producción de vapor por hora, (mv) y la energía (entalpía) del agua a la entrada (líquido sub enfriado) y a la temperatura de salida, que puede ser líquido sub enfriado, o mayor temperatura como vapor húmedo, vapor sobrecalentado.

Se calcula mediante la siguiente expresión, se acuerdo a como se muestra en la figura N° 3:

$$Q = m \times (h_2 - h_1) \quad (4.1)$$

Dónde:



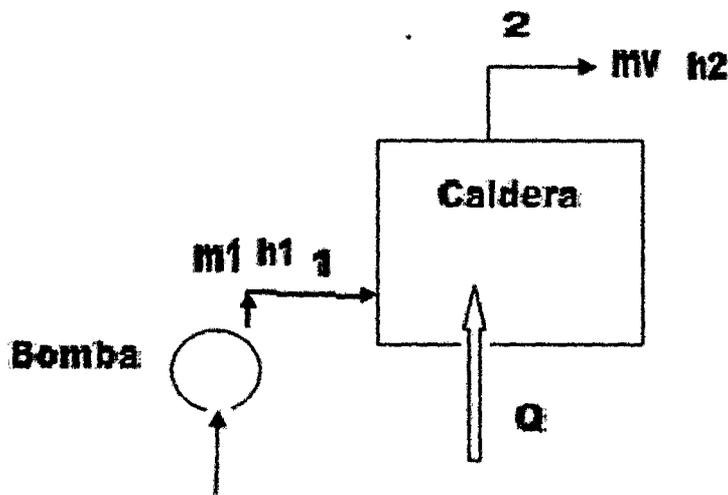
Q = flujo de calor, (Kj/h)

m = flujo másico de agua líquida o vapor, kg/h

h_2, h_1 = entalpia del agua líquida la entrada, y entalpia del vapor, Kj/kg

Figura N° 4.3

Esquema para determinar la capacidad calorífica de una caldera



Fuente. Elaboración propia, Ing. Alberto Emilio Panana Girio, 2015

Las entalpias h_1, h_2 se obtienen de las tablas de vapor de agua o mediante diagrama de vapor de agua, de acuerdo a la temperatura y presión del vapor según sea húmedo, seco, o sobrecalentado.

HP Caldera (BHP)

Es una forma de expresar la capacidad de una caldera, el cual es expresado en la placa de la caldera, proporcionada por el productor.

De acuerdo a las unidades en que se expresa el BHP de la caldera se debe tener en cuenta: 1 BHP es equivalente a 8441,61 kcal/h

4.6.2 Masa nominal de vapor, m_{es} como /h)

Es el flujo másico de vapor que produce una caldera si trabaja a la presión de una atmósfera absoluta, ($p_{man} = 0$), temperatura del agua a la entrada de 100 °C, (líquido saturado), y produce vapor saturado seco a 100 °C. Entonces otra forma de definir la capacidad calorífica de una caldera es como masa nominal, m_n

Normalmente la masa efectiva de vapor, (m_v) que produce una caldera, es menor que la masa nominal, (m_n).

4.6.3 Superficie de calefacción, (SC)

Es toda la superficie de transferencia de calor que puede existir entre el agua, (fluido frío) y los gases productos de combustión, (fluido caliente). Esta superficie se mide por el lado del fluido caliente. Generalmente a mayor superficie de calefacción aumenta la capacidad de la caldera. En una caldera pueden existir diferentes bancos o arreglos de tubos los cuales en su conjunto se determina la superficie de calentamiento, es superficie es expresada en, (m^2).

4.6.4 Coeficiente de evaporación, C_e , ($kg/h.m^2$)

El coeficiente de evaporación indica en forma aproximada la masa nominal, (m_n), que produce una caldera por cada m^2 de superficie de calefacción. Se define como superficie de calefacción directa aquella donde se transfiere calor por radiación, en el hogar. La superficie de calefacción indirecta, es donde el calor se transfiere por convección, en la zona de los tubos. En la tabla N°4.2 se muestra el coeficiente de evaporación para diferentes calderas.



Tabla N°4.2
Características de algunos tipos de calderas

Tipo de caldera		Presión máxima kg/cm ²	Masa nominal máxima kg/h	Superficie de calefacción m ²	Coefficiente de evaporación kg/h.m ²
Piro tubulares	Hogar exterior	10	3 500	22 - 230	12 - 15
	Escocesa	18	15 000	10 - 600	18 - 25
	Locomóvil	15	2 500	10 - 120	17 - 22
	Mixta	10	20 000	700	30 - 32
	Tambores	15	1 600	4 - 100	15
Acuo tubulares	Tubos rectos	100	230 000	25 - 2300	20 - 100
	Tubos curvos	225	2 000 000	Mayor a 100	20 - 600
	Circulación forzada	225	225 000 o más		3 000

Fuente: Balance térmico en una caldera piro tubular, Chávez Bello Enmanuel.

4.7 Balance de energía en una caldera

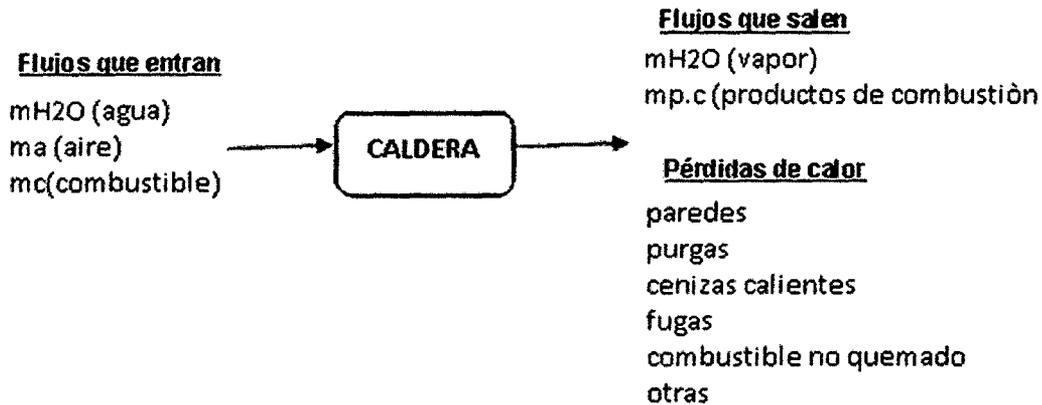
La realización de un balance térmico, consiste en aplicar los principios de conservación de masa y de la energía en una caldera o cualquier generador de vapor, cuando en estos equipos se ha conseguido las condiciones estacionarias sin variación en su funcionamiento.

El objetivo de realizar este balance térmico es el de conocer todas las cantidades de energías o flujos de calor, que entran y salen, es decir



todas las energías involucradas en la caldera. Esto se puede visualizar en la fig. N° 4

Fig. N° 4.4
Cantidades energía que entran o salen de la caldera



Fuente. Elaboración propia, Alberto E. Panana Girio, 2014

En el balance de calor de una caldera se establece la siguiente igualdad cuando ha alcanzado el funcionamiento en régimen estacionario

$$\text{CALOR ENTRANTE} = \text{CALOR SALIENTE} \quad (4.2)$$

4.8 Calor entrante

Los calores que entran a la caldera comprenden:

a. Energía del combustible

Esta cantidad de energía puede determinarse multiplicando la cantidad de masa de combustible (m_c) suministrado por el poder

calorífico inferior (PCI), tal como se expresa mediante la siguiente relación:

$$E_{com,} = m_c \times PC \text{ (Kcal/h)} \quad (4.3)$$

Dónde:

M_c = consumo de combustible (Kg/h)

PC = poder calorífico, inferior o superior del combustible (kJ/Kg).

El poder calorífico (PC) del combustible se puede expresar como poder calorífico bruto o superior (PCS); o como poder calorífico inferior (PCI)

El poder calorífico Superior (PCS)

Viene a ser la cantidad total de energía contenida en el combustible, considerando al agua contenida en los gases productos de combustión en estado de vapor de agua.

El poder calorífico Inferior o neto (PCI)

Es la cantidad de calor que entrega el combustible pero considerando a la cantidad de agua contenidos en los gases de chimenea en estado líquido.

En la siguiente tabla N° 4.3, se puede observar la cantidad de poder calorífico inferior (PCI) de combustibles.



Tabla N° 4.3

Poder Calorífico inferior o neto de combustibles

TIPO DE COMBUSTIBLE	PODER CALORIFICO NETO
Carbón térmico	419.405 MJ/T
Gasolina o naftas	4.872 MJ/T
Coque de petróleo	30.675 MJ/T
Gas licuado	3,765 MJ/T
Diésel	5.426 MJ/T
Combustóleo	6,019 MJ/T
Gas natural	33.913 KJ/m3
Bagazo de caña	7.055 MJ/T

Fuente: SENER, Balance Nacional de Energía 2005

b. Energía sensible del combustible, $E_{comb(s)}$

El flujo de calor sensible del combustible depende de la temperatura con que se ingresa a la cámara de combustión (hogar). Es importante solo si existe precalentamiento de combustible, se determina tal como se indica en la ecuación.

$$E_{comb(s)} = m_c \times h_c \text{ (Kcal/h)} \quad (4.4)$$

Dónde:

m_c = consumo de combustible (Kg/h)

$$h_e = C_{Pcomb} \cdot (T_{comb} - T_{ref}) \quad (4.5)$$

h_c = entalpia del combustible (Kcal/Kg)



T_{comb} = Temperatura de ingreso del combustible a la cámara de combustión

T_{ref} = Temperatura de referencia

c. Calor sensible del aire (E_{aire})

Este flujo de calor sensible depende de la temperatura con que ingresa el aire al hogar es importante solo si existe precalentamiento de aire

$$E_{\text{aire}} = m_c \cdot R_{a/c} \cdot h_a \text{ (k/w)} \quad (4.6)$$

Donde.

m_c = consumo de combustible (Kg/h)

$R_{a/c}$ = razón ($m_{\text{aire}} / m_{\text{combustible real}}$) de la combustión
(kg aire/kg comb).

h_a = entalpia de aire (kJ/kg) = $C_{\text{Paire}} \cdot (T_{\text{aire}} - T_{\text{ref}})$.

C_{Paire} = kJ/ (kg.K)

T_{aire} = temperatura de ingreso del aire a la cámara de combustión.

d. Cálculo del calor absorbido por el agua Q_w

El flujo de calor absorbido por el agua, determina la capacidad de la caldera, esta cantidad de calor se halla mediante la siguiente expresión,

$$Q_w = E_{\text{vapor}} - E_{\text{agua}} = m_w (h_2 - h_1) \text{ Kcal/h} \quad (4.7)$$

Dónde:

m_w = Cantidad de agua consumida (o vapor generado) Kg/h.



$h_1, h_2 =$ son las entalpías del agua a la entrada y salida (Kj/kg).

Se obtienen mediante las tablas de vapor, a las temperaturas respectivas.

4.9 Calor saliente

Los calores salientes de la caldera comprenden:

a. Calor del fluido de salida, vapor (Qfs)

$$Q_{fe} = h_{fs} \times P_v \times b \quad (4.8)$$

Donde

h_{fs} = Entalpía del fluido de salida [kcal/kg]

P_v = Producción de vapor (kg / h)

b = consumo horario de combustible

b. Perdida de Calor de los humos, o productos de combustión (QH)

Proceso de Combustión

En el proceso de combustión del combustible se producen muchas transformaciones y reacciones químicas, que dependen de la composición del tipo de combustible utilizado para la generación calorífica. En forma general todo combustible que tiene presente en su composición hidrogeno (H_2), este reaccionan con el oxígeno de aire y se generar agua (H_2O , el carbono (C), reaccionara para formar (CO_2), así como el azufre, (S) generará (SO_2), Al ocurrir estas reacciones se produce gran cantidad de calor, el cual se aprovecha para calentar y vaporizar el agua que se encuentra en la caldera.



Con el fin de que existas un buen rendimiento en la caldera se debe controlar la cantidad de aire que ingresa a la caldera, es decir en el quemador., puesto que puede ocurrir si se alimenta aire bastante alto disminuye la temperatura en la cámara de combustión el cual influye en el calor útil. Si la cantidad de aire que se alimenta es baja se producirá la combustión incompleta, saliendo parte del combustible sin quemar.

Para evitar estos problemas y tener una combustión completa del combustible se alimenta a la caldera una cantidad de aire en exceso, esta cantidad de aire permitirá una buena eficiencia en la caldera.

En la actualidad existen métodos y equipos para el control del proceso de combustión, el control de emisión de gases productos de combustión, con el fin de lograr obtener buena capacidad de la eficiencia de la caldera, buen control de la emisión de gases productos de combustión que se descarga a la atmosfera.

En consecuencia la pérdida de calor que se produce por los gases productos de combustión que salen de la caldera se debe en cuenta su temperatura y volumen de los gases, puesto que puede ocurrir:

A mayor temperatura de los gases menor será la eficiencia de la caldera-

A menor temperatura de los gases productos de combustión, puede ocurrir que los gases se encuentre por debajo de en su punto de roció ocurriendo la condensación del vapor de agua, produciendo corrosión en los tubos.

Este calor se puede determinar mediante la siguiente relación:

$$Q_{gc} = X \text{ [kg. humos/Ud. de combustible]} \times Y \text{ [kcal/kg humos]} \quad (4.9)$$



El calor de los gases de combustión se muestra en las Tablas N° en el anexo. Con él % de O₂ y CO₂ se obtiene el caudal de humos (X) expresado en kg de humos/Ud. de combustible. Con la temperatura de los humos, y en las mismas tablas, se encuentra la entalpía específica de los humos (Y) en kcal/kg humos.

c. Calor por gases no quemados (Q_{ig})

$$Q_{ig} = \left[\frac{21}{21-O_2} \right] / \left[\left(\frac{CO}{3.100} \right) + \left(\frac{CH}{1.000} \right) \right] \times [\% \text{ pérdidas PCI del comb.}]$$

(4.10)

Dónde:

[O₂] = Concentración de O₂ en los humos (%)

[CO] = Concentración de CO en los humos (ppm)

[CH] = Concentración de CH en los humos (ppm)

d. Calor de sólidos no quemados, (Q_{is})

Estas pérdidas de calor por sólidos no quemados producen opacidad en los gases productos de combustión.

La opacidad es el nivel de oscuridad con el que salen los productos de combustión (humos), y está formada por partículas sólidas y hollín sobrante de dicha combustión, la opacidad de los humos aparecerá en mayor proporción cuando más denso sea el combustible utilizado.

La opacidad se determina utilizando un instrumento llamado Opacímetro, yal como se muestra en el Anexo A.3.



Esto es similar a una mancha de bicicleta. Se envía una cierta cantidad de gases de combustión a un filtro de papel mediante un cierto número de bombeos. El tono gris de la mancha que se produce en el filtro de papel se compara con una escala de tonalidades de grises con diferentes números. La escala de opacidad determinada de esta forma de acuerdo con Bacharrach está entre 0 y 9. En las calderas que funcionan a gas no se realiza esta determinación. <http://Opacidad-gases es/test.2/>

La escala Bacharrach, la cual se presenta en la siguiente tabla.

Tabla N° 4.4

Índice de Bacharrach, para medida de la opacidad de los humos

BACHARRACH	PERDIDAS /% PC	Características de la combustión
1	0.8	Excelente. Ausencia de hollín
2	1.6	Buena, hollín poco perjudicial
3	2.4	Mediana, hay cantidad de hollín, se debe limpiar anual
4	3.5	Pobre, humo visible, moderado a rápido ensuciamiento
5	4.6	Muy pobre, ensuciamiento seguro. Varias limpiezas al año
6	5.7	Pobrísima

Fuente: [http://amt umh generación de calor, Balance energético en calderas, \(11/27\)](http://amt umh generación de calor, Balance energético en calderas, (11/27))



La opacidad se determina mediante la siguiente relación, tal como se indica en la referencia ASTM D 2156 – 94, Standard Test Method for Density in flue gases from Burning Destilate fuels-:

$$\text{Opacidad} = \sum_1^n \text{lectura}$$

Donde:

n = número de lecturas realizados durante la medida

e. Pérdidas de Calor por purgas (Qp)

El objetivo de descargar parte del agua de caldera es debido a que en él se encuentran los sólidos disueltos o en suspensión los cuales se van concentrando a medida que el agua se vaporiza, cuya presencia conduce a una serie de problemas en la caldera, como la incrustación lo que produce una reducción de la transferencia de calor por parte del combustible, produce una resistencia al flujo de calor.

Esta purga generalmente se realiza extrayendo el agua de la parte inferior de la caldera, en donde existe mayor concentración, para tener agua en la caldera se introduce agua de alimentación tratado el cual presenta menos concentración de sólidos así como los materiales disueltos. La determinación de las pérdidas de calor en la purga de agua se puede determinar mediante la siguiente relación;

$$Q_p = p \times \frac{hp}{b} \quad (4.11)$$

Dónde:

Q_p = [kcal/unidad de combustible]

p = Caudal de purgas en kg/h



h_p = Entalpía de la purga en kcal/kg purga y corresponde a la entalpía de líquido para la presión de generación de vapor.

b = Consumo horario de combustible m/h

Para calcular la purga continua necesaria en una caldera hay que realizar un balance de los distintos componentes a controlar.

$$P \cdot a = A \cdot b + P \cdot b \quad (4.12)$$

$$P = (A \cdot b) / (a - b) \quad (4.13)$$

Dónde:

P = Caudal de purga [kg/h]

a = Salinidad total en la caldera [ppm]. Se mira en las tablas que se presentan a continuación.

b = Salinidad total en el agua de aportación [ppm]. Se mide con el conductímetro.

A = Caudal de agua de aportación [kg/h] que es el caudal del vapor menos el caudal de condensados que se recuperan.

f. Pérdida de Calor por radiación (Q_r)

Debido a que la superficie exterior de la carcasa de la caldera está a una temperatura más alta que la temperatura del ambiente donde se encuentra, una parte del calor o energía se transfiere a los alrededores

El calor perdido por radiación se calcula midiendo la temperatura y la superficie de la caldera, se debe determinar tanto de las paredes verticales y horizontales.

Una caldera de tubos de humos o de agua de 5 MW, que se encuentra bien aislada la pérdida de calor por radiación equivale de



0,3 a 0.5 % de su energía. En calderas de menor potencia, el porcentaje de pérdidas por radiación puede variar de 1,3 % para una caldera de 600 CC (caballos de caldera) hasta 3, o % para una caldera de 50 CC.

g. Rendimiento Térmico:

El rendimiento térmico es el índice del aprovechamiento de la energía en una caldera. Para determinarlo, se establecen dos mecanismos:

g1. Medición del Rendimiento Directo

Para determinar el rendimiento térmico directo se requiere medir el consumo de combustible, el vapor generado, la presión, la temperatura del agua a la entrada y salida y el tipo de combustible. Se puede realizar mediante la siguiente expresión. :

$$\eta_{directo} = \frac{m_w \times (h_2 - h_1)}{m_c \times PCI} \quad (4.14)$$

Dónde:

m_w = producción de vapor, (kg/h)

h_2 = entalpia del vapor, (Kcal/kg)

h_1 = entalpia del fluido de entrada, (kcal/kg)

m_c = consumo de combustible, (cantidad de combustible/h)

PCI = poder calorífico del combustible, (kcal/ unidad másica de combustible)

g2. Medición del Rendimiento Indirecto

Considerando que la ganancia principal proviene del PCI del combustible y las pérdidas de calor ($E_{p.c}$ y $E_{perdidas}$), se pueden expresar en función de cada kg de combustible (m_c), para calcular este rendimiento es mediante la siguiente expresión:



$$\eta_{indirecto} = 1 - \frac{h_{cp} + q_p}{PCI} \quad (4.15)$$

Dónde:

h_{pc} = entalpia de los productos de combustión. (kJ/kg).

Q_p = Perdidas de calor (diferentes a los p.c.) expresadas en porcentaje del PCI. Depende del tamaño y producción de vapor de la caldera.

La entalpia de los productos de combustión, en forma rigurosa se obtiene midiendo la temperatura y la composición de los productos de combustión. y en forma aproximada es,

$$h_{pc} = C_{aire} (T_{ch} - T_{ref}) \quad (4.16)$$

El Rendimiento Indirecto, se puede calcular sin conocer los flujos máxicos de consumo de combustible y de generación de vapor con exactitud, pero se debe realizar un análisis de los productos de combustión (composición y temperatura), también conocer el (PCI) del combustible que se está quemando. El principal inconveniente es una menor precisión con respecto al rendimiento directo. En la siguiente tabla, para cierta masa nominal (kg/h), se puede ver la variación de las pérdidas de calor, (q_p), en el siguiente tabla N° 4.5



Tabla N° 4.5

Variación de las pérdidas de calor al ambiente con relación a la masa del combustible.

Masa nominal Kg/h	Perdidas al ambiente (q_p) % PCI
Mayor a 18.000	Menores a 1%
5.000 a 18.000	5% a 1%
1.000 a 5.000	10% a 5%
Menores a 1.000	20% a 10%

Fuente: Capítulo 2, diseño de una Caldera piro tubular. pdf,

En general, el rendimiento depende del tipo de caldera, la capacidad y el tipo de combustible, en el siguiente cuadro se puede apreciar el rendimiento según el tipo de caldera.

Tabla N° 4.6

Rendimiento de una caldera, según el tipo de caldera

TIPO DE CALDERA	RENDIMIENTO (%)
De calefacción, pequeña, carbón, hogar exterior , vertical pequeña, hogar interior	55 - 65
Tubos de humo, horizontal 2 pasos, hogar exterior, madera	65 - 70
Escocesa de petróleo y carbón Compactas de carbón	70 - 80
Tubos de agua, sin sobre calentador Sin economizador	78 - 80
Tubos de agua, plantas termoeléctricas	80 - 90
Caldera planta termoeléctrica vapor – carbón	87
Caldera tubos de agua, lecho fluid izado.	91

Fuente: Capítulo 2, diseño de una Caldera piro tubular. pdf,



V MATERIALES Y MÉTODOS

En una caldera diseñar, primero se deben representar los flujos de entrada y salida, para luego hacer sus determinaciones, entre los cuales se tienen los siguientes flujos.

5.1 Flujos

Los flujos, de combustible, al igual que el agua se determinan por tiempos de trabajo y la variación de los niveles en sus respectivos tanques de alimentar.

5.1.1 Flujo de aire

Para una combustión completa, se calcula el aire teórico para quemar un kg de diésel y se multiplica por 1.1 (con el porcentaje de exceso de aire para obtener el real). El flujo de aire se expresó en m^3/kg combustible, que multiplicado por el flujo de combustible que entra a la caldera da el flujo de aire en m^3/s .

5.1.2 Consumo de electricidad

Es el que consume el generador, el ventilador y la bomba de combustible, se mide el consumo de energía en watts.

5.1.3 Consumo de vapor

Se asume igual al del agua. Se mide el consumo de agua en tanque de alimentar al inicio y al final, con esto se determina el consumo horario de agua.



5.1.4 Masa de gases de escape

Se determina como la suma de la masa del combustible y del aire de entrada.

5.1.5 Pérdidas de calor al ambiente

Por las paredes del generador de vapor: se determina las temperaturas de las superficies con un termómetro, se aplica la ley de enfriamiento de Newton.

5.1.6 Otros datos, se obtienen por los equipos de medición de la caldera.

5.1.7 La composición gravimétrica real del combustible

El combustible que se alimenta al quemador puede ser referido al que se encontrar en la literatura, debido a que esto no varía significativamente de un diésel a otro (Molina, 1993).

5.2 Instrumentación empleados

a. **Manómetros Bourbon** Instalados en el hogar de la Cadera, a la salida del vapor de agua, en la entrada de agua alimentación a la caldera con una precisión de 0.1 kgf/cm^2 .

b. **Termómetros,**

Los termómetros deben tener una precisión 1°C , colocados en la chimenea, tanque de agua de alimentación, y en la superficie de la Caldera.



c. Cronometro,

Los cronómetros deben tener una precisión 0.1 segundos.

d. Flujo metro Ultrasónico,

Puede ser del tipo Portaflow 300, o de otra marca

e. Los medidores de nivel (rotámetros), estos son colocados para medir el nivel a agua en la caldera, en el tanque de combustible, su determinación se puede realizar por métodos matemáticos de integración.

f. Cinta métrica, precisión 1mm.

g. Pie de rey, precisión 0.01mm.

h. Vatímetro, precisión 0.1 kW.

5.3 Método de cálculo para la realización de los balances

Se establece primero que tipo de caldera se va a diseñar, la determinación de los flujos tanto de entrada y salida de los mismos, con ellos se realizan los balances según su carácter y posteriormente se realiza el cálculo de rendimiento de la caldera así como el rendimiento de la combustión., (Faires, 1991; Houguen, 1978; Martínez, 2005M; Moran, 2000).

A continuación se especificara con más detalles los pasos a seguir.



5.3.1 Medición de las variables

Establecidos los flujos de entrada y salida se pasa a la medición de estos con los instrumentos mencionados, las mediciones se realizan cuando el generador de vapor lleva 10 minutos de trabajo para que se acerque en lo posible a la operación en estado estacionario, para esto se han de determinar los siguientes valores:

- a. Mediciones de todos los flujos de entrada y salida a la caldera
- b. Presión de vapor, (P_v)
- c. Temperatura de vapor, (T_v)
- d. Temperatura del agua de alimentación, (T_{H_2O})
- e. Flujo de vapor de agua generado, (G_{vapor})
- f. Flujo de aire alimentado, (G_{aire}).
- g. Flujo de combustible, (G_{com}),
- h. Flujo de los gases de escape, (G_G).
- i. Potencia eléctrica consumida por el generador de vapor, P_{elect} .
- j. coeficiente o porcentaje de exceso de aire, (α),

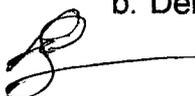
5.3.2 Flujo de Combustible (puede ser diesel, gas o residual)

Se han de conocer las principales características del combustible que ha de consumirse en el quemador de la caldera, entre estos tenemos:

- a. La composición química del combustible, puede ser:

C = 86 %: H = 13 % S = 0.9 % W = 0.1 % de Humedad del Combustible,

- b. Densidad del combustible, $\rho_D = 860 \text{ kg/m}^3$.



5.4 Balances a realizarse en la caldera para el análisis energético.

5.4.1 Balance de masa

$$G_{\text{aire}} + G_{\text{H}_2\text{O}} + G_{\text{comb}} = G_{\text{G}} + G_{\text{vapor}} \quad (5.1)$$

Dónde:

G = son los flujos másicos, de agua, de aire.
Combustible, vapor.

De acuerdo con, Faires, 1991; Houguen, 1978; Martínez, 2005; Moran, 2000; Pavlov, 1981.

5.4.2 Balance energético

En el análisis energético se tienen en cuenta todas las energías que entran y salen del equipo. Se aplica el primer principio de la termodinámica. En el caso de los flujos entrantes y salientes son multiplicados por sus entalpías correspondientes. Para el combustible, la energía de entrada es el poder calorífico inferior. (Faires, 1991; Houguen, 1978; Martínez, 2005; Moran, 2000; Pavlov, 1981).

$$G_{\text{aire}} h_{\text{aire}} + G_{\text{H}_2\text{O}} h_{\text{H}_2\text{O}} + G_{\text{comb}} \cdot \text{PCI} + P_{\text{elect}} = q_r + G_{\text{G}} \cdot h_{\text{G}} + G_{\text{vapor}} h_{\text{vapor}} \quad (5.2)$$

Dónde:

h = entalpías específicas de las sustancias

q = calor rechazado por el generador a través de sus paredes.

La temperatura del aire de referencia (AR), para la realización de los cálculos será de T=25 °C. El agua de alimentación a la caldera es a la temperatura ambiente 25°C.



La igualdad planteada en la ecuación del balance de masa, pueda que no se cumpla, por un error del 0,34 %, esto no puede recuperarse en la eficacia de los resultados, esto se atribuye esencialmente a los errores introducidos en los cálculos, cuando se determinación los datos como consecuencia de no realizar una buena precisión en el proceso de medición.

5.4.3 Determinación del rendimiento energético

El rendimiento energético de la caldera también se puede determinar mediante la siguiente relación:

$$\eta_{Ener} = \frac{P}{F} = \frac{E_{vapor} - E_{H_2O}}{E_{aire} + E_{comb} + P_{elec}} \quad (5.3)$$

Dónde:

P= producto: Energía del vapor- Energía del agua alimentada

F = Energía del aire + Energía del combustible + Potencial eléctrico, (Faires 199, Hougen 1978, Martínez 2005, Moran 2000.

Se presenta algunas consideraciones que se deberá tener en cuenta para obtener mejoras en el rendimiento energético por ende un mejor funcionamiento de la caldera.

5.4.4 Medidas para mejorar la eficiencia de una caldera piro tubular.

Dentro de las medidas que se debe tener en cuenta para tener un mejor funcionamiento de la caldera, se tiene:



a. Ajuste de la combustión

El ahorro energético debido al ajuste del proceso de combustión, se ha de determinar el rendimiento antes (η_a) y después (η_d), del ajuste de la combustión., esto se realiza mediante la ecuación:

$$A = \frac{\eta_a - \eta_d}{\eta_a} \times 100 \quad (5.4)$$

Si la caldera consume, (m), unidades de combustible al año el ahorro anual será:

$$A \times m \quad (5.5)$$

Dónde:

A = ahorro energético

η_a ; η_d = rendimiento

Con el fin de mejorar la combustión, se debe realizar;

a1. Ajustar la combustión de forma manual.

a2. Cambiar el quemador o los quemadores.

a3. Para controlar la cantidad de:

O₂; O₂+CO; O₂+CO+Opacidad se deben instalar controladores.

En función del consumo anual de la caldera, que justifique la inversión se realizara las medidas a1, a2, ò a3.

b. Economizador en la caldera

La instalación de economizadores en las calderas es con el fin de aprovechar el calor que contienen los gases productos de



combustión que salen de la caldera, calentando el agua que ingresa a la caldera.

Generalmente el ahorro de energía, mediante la instalación de economizadores se determina calculando los rendimientos antes y después de esta acción. Para esto los rendimientos se hallan por el método indirecto, es decir:

$$\eta = 1 - \frac{Q_{perdidas}}{PCI} \quad (5.6)$$

Dónde:

$$Q_{perdidas} = Q_{humos} + Q_{inquemados} + Q_{purgas} + Q_{radiación} \quad (5.7)$$

Cuando se instalan economizadores en una caldera, solo varía la cantidad de calor de los humos, puesto que su temperatura disminuye a la salida de los gases disminuye.

c. Precalentamiento del aire alimentado a la caldera.

El calentamiento del aire que se alimenta a la caldera generalmente se ha de encontrar a una temperatura superior al del ambiente, es por eso se aprovecha el calor residual de los gases de combustión que salen de la caldera para calentar el aire.

En forma similar al caso anterior el ahorro de energía por lo la instalación economizadores, se realiza mediante el cálculo de los rendimientos antes y después de la mejora. Para esta determinación se realiza mediante la fórmula N° 3.2



d. Recuperación del calor de purgas

La recuperación del calor de las purgas consiste en extraer sólidos disueltos y en suspensión que se encuentra en la caldera. Al vaporizarse el agua aumenta la concentración de los sólidos en agua que queda dentro de la caldera.

Por tanto el agua descargada en las purgas de las calderas de vapor está a temperaturas y presión elevadas. Por tanto el calor que presentan las aguas de purgas se recupera, expansionándolas en un tanque y utilizando la parte líquida y el vapor que contienen.

Para determinar el ahorro mediante la recuperación del calor de las purgas, se puede realizar mediante la siguiente ecuación:

$$A = \frac{Q(\text{kcal} / \text{año})}{\eta \times \text{PCI}(\text{kcal} / \text{und.comb})} \quad (5.7)$$

Dónde:

Q = Calor recuperado del condensado o purga

η = Rendimiento de la caldera

PCI = Poder calorífico inferior del combustible

e. Calor fugado en tuberías y tanques

El ahorro de energía producido por el calor fugado de las tuberías y tanques se realiza calculando las diferentes pérdidas de calor en las tuberías no aislados, de igual forma el calor perdido en los accesorios se determina utilizando el ábaco s. Las pérdidas en los siguientes accesorios se pueden mencionar:

Para una válvula equivale 1,8 m. de tubería



Para los codos, T, injertos, reducciones equivalen en función de diámetro de la tubería.

De 1 a 1,5 pulgadas corresponden a 1 m de tubería

De 2 a 5 pulgadas corresponden a 1,5 m de tubería

De 5.5 a 10 pulgadas corresponden a 2 m de tubería

Las pérdidas de los elementos se determinan por los ábacos del suministrador del aislamiento,

Para el cálculo de las pérdidas en tanques y depósitos se utilizan las tablas. El ahorro es mediante la ecuación:

$$A = \frac{\Delta Q \text{ (kcal/h)} \times H \text{ (h/año)}}{\eta \times \text{PCI (kcal/unid,comb)}} \quad (5.8)$$

Donde:

ΔQ = Diferencia de pérdida de calor fugado .

H = horas de funcionamiento al año

η = rendimiento de la caldera

PCI = Poder calorífico del combustible

f. Eliminación de fugas de vapor

Cualesquier fuga de vapor lleva consigo una pérdida de energética Para lograr un ahorro de energía de acuerdo a este aspecto, se tiene que localizar y eliminar las fugas de vapor que se produzca.

La cantidad de calor perdido por fuga de vapor se realiza mediante la siguiente ecuación:



$$Q = k \cdot d^2 \sqrt{P(P+1)} \quad (5.9)$$

Dónde:

Qv = caudal de fluido que sale por el orificio (kg/h)

d = diámetro del orificio, (mm)

P = Presión manométrica del vapor, (kgf/cm²)

Coficiente de valor (0,35 – 0,45)

Otra forma de determinar esta cantidad másica es mediante tablas para cálculo del caudal de vapor perdido a través de las fugas.

El ahorro de energía por eliminación de fugas de vapor es mediante la expresión:

$$A = \frac{Q \times H}{X} \quad (5.10)$$

Dónde:

Q = Caudal de vapor que se pierde, (kg/h)

H = tiempo en la que pueda estar presente la fuga de vapor, (h/año)

X = Producción específica de vapor, (kg de vapor/ unidad de combustible)

g. Mantenimiento de purgadores

Los purgadores de vapor son válvulas automáticas instaladas en las tuberías de vapor con el fin de eliminar los condensados así como el aire que puedan estar presentes.

Los purgadores actúan en función de diversos parámetros, entre estos:



Físicos, como la densidad,

Termostáticos, en base a diferencia de temperaturas, entre el vapor y el condensado

Termodinámicos, si es que hay cambio de fases.

Un parámetro importante para el buen funcionamiento de los purgadores y su buena eficiencia es que deben ser bien instalados correctamente. El ahorro de energía se puede determinar mediante la ecuación N°

h. Expansión del condensado de alta presión

Esta acción permite utilizar el condensado de vapor de alta presión producido generar más vapor a una presión inferior para utilizar este vapor en alguna parte del proceso productivo.

El objetivo de expansionar el condensado que se encuentra a alta presión en un tanque para generar vapor y nuevos condensados a una presión menor, se pueden expansionar nuevamente este vapor o condensado en otro tanque, sucesivamente. Para realizar las expansiones sucesivamente, se tiene que tener en cuenta el ahorro de energía con el costo de la instalación de los nuevos tanques.

Para determinar el ahorro energético, se ha de realizar el balance de masa y energía en el tanque de expansión. El ahorro de energía se determina con la ecuación N° 5.10

i. Recuperación de condensados.

La recuperación de energía se puede realizar en:



- Tanques de condensados atmosférico

Esta recuperación se realiza en un intercambiador de calor o en un tanque flash, obteniéndose vapor para utilizarlo en otra parte del proceso productivo para el precalentamiento del agua de aporte a la caldera, lo cual lleva a un ahorro de uso de combustible.

Como se conoce el rendimiento de la caldera, se aplica la ecuación directa para obtener la producción de vapor por unidad de combustible:

$$\eta = X \frac{H_v - H_c}{PCI} \quad (5.11)$$

Dónde:

H = Rendimiento de la caldera

X = Producción específica de vapor (kg de vapor/ unidad de combustible)

H_v = Entalpia del vapor (kcal/kg)

H_c = Entalpia del agua de aporte a la caldera (kcal/kg)

PCI = Poder calorífico inferior del combustible, (kcal/unid. De combustible)

El ahorro de combustible se calcula mediante la relación:

$$A = \frac{X_F - X_I}{X_F} \quad (5.12)$$

Dónde:

X_F = Producción específica de vapor después de la mejora.

X_I = Producción de vapor antes de la mejora.

Este ahorro se multiplica por el consumo másico de combustible al año para obtener el ahorro anual.



j. Recuperación de condensados a presión en instalaciones tipo circuito cerrado

La recuperación se realiza aprovechando el condensado a una presión intermedia entre la presión de uso y la presión atmosférica. Generalmente el tanque de alimentación se encuentra presurizado y se utiliza una bomba de alimentación a la caldera capaz de trabajar a dicha presión.

El ahorro energético se realiza utilizando la expresión anterior, sola que (H_c) será la entalpia del condensado.



VI. RESULTADOS

En este capítulo se realiza los cálculos de las variables de la caldera piro tubular, para lo cual se sigue el siguiente procedimiento, Para la realización del balance se han de realizar considerando las siguientes condiciones:

Los cálculos a determinar, se considera que la caldera opera en condicione estacionaria, es decir las variables involucradas de la caldera se mantuvieron constante en un lapso de una hora.

Para el funcionamiento de la caldera se utiliza como combustible petróleo residual N° 5.

Se debe mencionar que la humedad de los gases de chimenea originado por la combustión del hidrogeno del combustible se deberá realizar un balance en base al poder calorífico superior (PCS). Pero en este caso no es conveniente que se realice la condensación del vapor del vapor de agua en la chimenea, por lo que se realizara el balance térmico en base al poder calorífico inferior (PCI) del combustible es decir seco.

6.1 Condiciones de la caldera piro tubular, para el cálculo del Balance térmico. Por lo cual se tiene los siguientes parámetros de operación:

- a. Masa de vapor producido, (mv) = 10 000 kg/h
- b. Temperatura de descarga del vapor, T_v = 400 °C
- c. Presión de descarga del vapor, P_{rv} = 400 Kpa.
- d. Temperatura de agua de alimentación, t_a = 100 pc
- e. Presión del agua de alimentación, P_{agua} = 4500 Kpa.
- f. Combustible consumido, mc = 870 kg/h



- g- Temperatura de bulbo seco de los gases de descarga en la chimenea, $T_{bsg} = 230 \text{ } ^\circ\text{C}$
- h. Temperatura de bulbo seco del aire de alimentación, $T_{bsa} = 26,6 \text{ } ^\circ\text{C}$
- i. Temperatura de bulbo húmedo del aire de alimentación, $T_{bha} = 21, \text{ } ^\circ\text{C}$
- J. Presión atmosférica, $P_a = 101 \text{ Kpa}$.
- k. Temperatura del combustible en el quemador, $T_{cq} = 30 \text{ } ^\circ\text{C}$
- L. Porcentaje de humedad en el combustible, $\% H_p = 3$
- m .Porcentaje volumétrico del analizador de gases = $\text{CO}_2 \text{ } 11,2 \text{ } \%$; $\text{CO} \text{ } 1,1\%$

6.2. Cálculo del calor útil entregado al vapor de descarga de la caldera, $Q_v = \text{kcal/kg combustible-}$

$$Q_v = \frac{m_v}{m_c} (h_s - h_e) \quad (6.1)$$

Donde:

m_v = flujo masico de vapor generado, (kgvapor/s)

m_c = flujo masico de combustible consumido, (kg comb/s)

h_s = entalpia del vapor generado (kcal/ksg agua)

h_e = entalpia del agua de alimentaciòn (kcal/kg agua)

Por tablas de vapor de agua, a las condiciones de temperatura y presión del vapor recalentado y del agua líquida, se obtienen las entalpias:

$h_s = 766,38 \text{ kcal/kg}$

$h_e = 100,04 \text{ kcal/kg}$

Entonces, reemplazando los datos en la ecuación (6.1):



$$Q_v = \frac{10000}{870} (766,38 - 100,04)$$

$$Q_v = 7659,08 \text{ kcal / kg}$$

6.3 Cálculo de calores perdidos

6.3.1 Cálculo del calor perdido al ambiente por el aire seco en la chimenea, ($Q_g = \text{kcal/kg comb.}$)

$$Q_g = R_{as/c} \cdot C_{p_{as}} (T_s - T_e) \quad (6.2)$$

$$R_{as/c} = \frac{R_{a/c}}{1 + H_E} \quad (6.3)$$

a. Cálculo de $R_{as/c}$

$$\lambda = \frac{R_{a/c}}{R_{a/ci}} \quad (6.5)$$

si $\lambda > 1 \rightarrow$ Mezcla con exceso de aire o mezcla pobre

si $\lambda < 1 \rightarrow$ Mezcla con defecto de aire o mezcla rica

Donde:

$R_{as/c}$ = relación de aire seco a combustible seco
(kg aire seco/kg comb.)

$R_{a/ci}$ = relación aire/combustible teórico

$C_{p_{as}}$ = calor específico del aire seco
(kj/kg.K=1,0035 ò 0.24 kcal/kg.K)

T_s = Temp. de bulbo seco de gases descarga
de chimenea, °C

T_e = Temp. de bulbo seco del aire de entrada
al hogar, °C

$R_{a/c}$ = relación de aire húmedo a combustible seco
kg aire humedo/kg comb

H_E = humedad específica del aire ambiente
kg vapor agua/kg aire seco



b. Al no contar con el análisis gravimétrico del combustible lo ubicamos en el diagrama de Ostwald para el combustible N° 5

$$C = 0,85 \quad (85\%)$$

$$H = 0,12 \quad (12\%)$$

$$S = 0,025 \quad (2,5\%)$$

Reemplazando en la ecuación (6.3)

$$R_{a/ci} = \frac{\text{kg O}_2}{\text{kg comb}} \times \frac{100 \text{ kg aire}}{23,1 \text{ kg O}_2} \times \frac{\text{kg aire}}{\text{kg comb}}$$

$$R_{a/ci} = 4,32 \times (2,66 C + 8 H + S - O)$$

Estequiometría

$$R_{a/ci} = 14,02 \text{ kg/kg}$$

c. Con los datos del análisis volumétrico de gases, utilizando el diagrama de Ostwald, ver en el anexo N° 2. Componentes del combustible:

$$\text{CO}_2 = 11,2 \%$$

$$\text{CO} = 1,1 \%$$

$$\lambda = 1,26; \quad \text{Por lo tanto:}$$

$$R_{a/c} = \lambda \cdot R_{a/ci} = 1,26 \times 14,02$$

$$R_{a/c} = 17,67 \text{ kg aire/kg comb.}$$

c. Cálculo de H_E

A partir del diagrama psicométrico para la T_{BS} y T_{BH}

$$T_{BS} = 26,6 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_{BH} = 21,1 \text{ }^\circ\text{C}$$

$H_E = 0.0136 \text{ kg agua / kg aire seco, entonces:}$



$$T_s = 230 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_e = T_{BS} = 26,6 \text{ }^\circ\text{C} \equiv 79,9 \text{ }^\circ\text{F}$$

$$Q_g = \frac{R_{a/c}}{1+H_e} \times C_{p_{as}} \times (T_s - T_e) \quad (6.6)$$

$$Q_g = \frac{17,67}{1+0,0136} \times 0,24 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \times (230 - 26,6)^\circ\text{C}$$

$$Q_g = 851,0 \text{ kcal/kg combustible}$$

6.3.2 Cálculo del calor perdido por humedad del aire de entrada al hogar, Q_{HA} (kcal/kg comb.)

$$Q_{HA} = \frac{R_{a/c}}{1+H_E} \times H_E \times (h_{vS} - h_{ve}) = \frac{R_{a/c}}{1+H_E} \times (h'_{vS} - h'_{ve}) \quad (6.7)$$

Donde.

h_{vS} = Entalpia del vapor de agua T_s y a la presión parcial correspondiente (T.V.R o' T.V.S); (kcal/kg agua)

h_{ve} = Entalpia del vapor de agua T_e y a la presión parcial correspondiente (T.V.S); (kcal/kg agua)

h'_{vS} = Entalpia del vapor de agua obtenida del Diagrama Psicrométrico, (kcal/kg aire seco)

h'_{ve} = Entalpia del vapor de agua obtenida del Diagrama Psicrométrico, (kcal/kg aire seco)

Determinación de h_{vs}



A la temperatura $T_s = 230 \text{ }^\circ\text{C}$

$P=10 \text{ Kpa}$ (presión parcial aproximada por productos de combustión de hidrocarburos típicos)

T.V.R. $\rightarrow h_{vs} = 2977,3 \text{ kJ/kg de agua} \equiv 709,45 \text{ kcal/kg agua}$

Determinación de h_{ve}

A la temperatura $T_e = 26,6 \rightarrow \text{T.V.S.}$

Entonces: $h_{ve} = h_g(26,6^\circ\text{C}) = 2550,8 \text{ kJ/kg agua} = 608,8 \text{ kcal/kg agua}$

Reemplazando:

$$Q_{HA} = \frac{17,67}{1+0,0136} \times 0,0136 \times (2977,3 - 2550,8)$$

$$Q_{HA} = 101,11 \frac{\text{kcal}}{\text{kg comb.}}$$

6.3.3 Cálculo del calor perdido por la humedad contenido en el combustible, ($Q_{hc} = \text{kcal/kg comb.}$)

$$Q_{hc} = H_c \times (h_{vs} - h_{ac}) \quad (6-8)$$

Dónde:

H_c = humedad del combustible (kg agua/kg comb)

h_{vs} = entalpia del vapor de agua a T_s y a la presión correspondiente (T.V.R o' T.V.S)

h_{ac} = entalpia del agua (líquido saturado) en el combustible a la temperatura de entrada al quemador (kcal/kg agua)

Cálculo de h_{vs}



Hvs = 2977,3 kJ/kg agua = 709,45 kcal/kg agua

- Determinación de hac

A la Tec = 30 °C → T.V.S. hf (30 °C) = 125,79 kJ/kg agua ≅ 30,04 kcal/kg agua

- Reemplazando:

$$Q_{hc} = 0,03 \frac{\text{kg agua}}{\text{kg comb.}} \times (709,45 - 30,04) \frac{\text{kcal}}{\text{kg agua}}$$

$$Q_{hc} = 20,38 \frac{\text{kcal}}{\text{kg comb.}}$$

6.3.4 Cálculo del calor perdido por la combustión incompleta, Qci = kcal/ kg comb.)

$$Q_{ci} = CC \times RVCO \times K \quad (6.9)$$

Dónde:

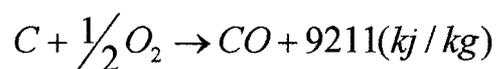
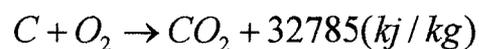
CC = contenido de carbono en el combustible (kg/kg)

RVCO = Relación de volumen del CO con respecto al (CO+CO₂)

K = energía no utilizada por la combustión incompleta = 23574 kJ/kg

ò 5634,186 kcal/kg

Nota 1. Determinación de K



$$K = 23574 \text{kJ} / \text{kg}$$

Nota 2. Determinación del CC:



Del Diagrama de Ostwald, CC = 85 %

Nota 3. Determinación de RVCO,

$$RVCO = \frac{CO}{CO + CO_2} = \frac{1.1}{1.1 + 11.2} = 0.0894$$

Remplazando en la ecuación (6.5)

$$Q_{ci} = 0,85 \times 0,0894 \times 5634,186 \text{ kcal / kg comb}$$

$$Q_{ci} = 428,14 \text{ kcal / kg comb}$$

6.3.5 Calculo del calor perdido al ambiente por convección y radiación (Qcr), (kcal/kg comb)

$$Q_{cr} = H_i - (Q_v + Q_g + Q_{ha} + Q_{he} + Q_{ci})$$

Donde:

$$H_i = \text{poder calorifico inferior (kcal / kg.comb)} \quad (5.6)$$

$$H_i = 41460 \text{ Kj / kg.comb} \equiv 9902,55 \text{ kcal / kg.comb}$$

Reemplazando los valores en la ecuación (5.6), se tiene:

$$Q_{cr} = 9902,55 - (7659,05 + 851,0 + 101,11 + 20,38 + 428,14)$$

$$Q_{cr} = 844,2258 \text{ kcal / kg.comb}$$

6.3.6 Rendimiento de la caldera, (η), por el método directo, llamado también rendimiento bruto.

$$\eta = \frac{Q_v \text{ (calor util entregado al vapor (kcal/kg comb))}}{H_i \text{ (poder calorifico inferior (kcal/kg comb))}}$$

$$\eta = \frac{7659.08}{9902,55} = 0,773 \text{ } \hat{=} \text{ } 77,3 \%$$



6.3.7 Cálculo de los BPH de la caldera

Masa de producción de vapor por la caldera, (mv = kg/h)

mv = = 10000 kg/h

Entalpia del vapor a las condiciones de salida, hv =766,38 kcal/kg

Entalpia del agua líquida de entrada, ha = 100,04 Kcal/h

Calor útil: Qu = mv x (hv –ha)

$$Qu = 10000 \times (766.38 - 100,04)$$

$$Qu = 6663400,00 \text{ kcal/h}$$

1 HP vaporiza en una hora, a 100 °C, 15,44 LB DE AGUA

Entalpia de vaporización a 100 °C, hfg = 540 lcal/kg

Entonces los BHP serán:

$$\text{BHP} = \frac{Q_v}{h_{fg} \times 15.44} = \frac{6663400,00}{8332.566}$$

$$\text{BHP} = 799,68$$

6.3.8 Superficie calentamiento. (A = m2)

Se tiene que para, 1 HP se requieren 0,50 m² de superficie, por tanto

$$A = 799,68 \times 0,5 = 399,84 \text{ m}^2$$

De los cálculos realizados en este capítulo, se tienen los siguientes resultados, de las energías involucradas en el balance térmico de la caldera .piro tubular tal como se muestra en la tabla

Nº 6.1:



Tabla N° 6.1

Resumen de los resultados obtenidos de los cálculos del balance térmico de la caldera piro tubular.

CALOR	Cantidad kcal/kg comb.	%
Hi	9902,55 kcal/kg.comb	100%
Qv	7659,08 kcal/kg.comb	77,34%
Qcr	920,1 kcal/kg.comb	9,29%
Qg	851,0 kcal/kg.comb	8,59%
Qci	428,14 kcal/kg.comb	4,32%
Qhs	100.95 kcal/kg.comb	0.24%
Qhe	20,38 kcal/kg.comb	0,20%
η	77,3%	
BHP	799.68	
A	399.84	m²

Fuente: Elaboración propia, Ing. Alberto E. Panana Girio, 2015

6.4 Mediante la aplicación de la hoja de cálculo (Excel), se determina las variables para el balance térmico de la caldera piro tubular.

El propósito de Excel, es con el fin de ilustrar el procedimiento de cálculo utilizando un computador, siguiendo procedimiento planteado el anexo N° A.6, además sirve para la realización de los cálculos del balance térmico para otro tipo de caldera como las calderas acuo tubulares.



Con el Exel se puede determinar:

Los calores que ingresan a través de los flujos a la caldera.

La cantidad de vapor producido

Los calores que se pierden a través de los flujos que salen de la caldera.

El rendimiento de la caldera

La potencia o BHP de la caldera.

La superficie de calentamiento

APLICACIÓN DEL EXCEL PARA EL CALCULO DE LOS PARAMETROS DEL BALANCE TERMICO DE LA CALDERA PIROTUBULAR de acuerdo a los datos formulados en el apartado (6.1)

1. DATOS DE LA CALDERA PIROTUBULAR	
Masa de vapor producido, (mv= kg/h)	10000,00
Temp.descarga de vapor, (Tv, °C)	400,00
Presión descarga vapor. (Prv, Kpa)	400,00
Temp.agua alimentación, (Ta , °C)	100,00
Presión agua alimentación, (Pag, Kpa)	4500,00
Combustible consumido, (mc, kg/h)	870,00
Temp. BS gases chimenea, (TBS, °C)	230,00
Temp. BS aire, alimentación, (TBSa. °C)	26,6
Temp.BH aire alimentación,(TBHa, °C)	21
Presión atmosférica, Pa, Kpa)	101,0000000
Temp.combustible.quemador, (TCQ, °C)	30,000000
Porcentaje humedad comb. (%Hp)	3,000
% volumétrico analizador de gases, mol	
% CO2 mol, 11.2	1,1200E+01
% CO mo, 1.1%	1,1000E+00
2. Por tabla de vapor de agua	
Entalpia vapor generado, hs=kcal/kg	766,38
Entalpia agua liq,alimentada, he=kcal/kg	100,04000000
3. Por carta Psicrometría aire - vapor agua	
Con TBS = 26.6 °C y TBH = 21.1 °C	
La humedad del aire HE = kg H2O/kg as	0,013600
Calor especifico del aire (Cp = Kcal/kg.K)	0,240000

4. Calor útil entreg. al vapor, Qv= kcal/kg	
$Q_v = (mv/mc)(h_s - m_e)$	$(B7/B12) \cdot (B25 - B24)$
5. Calor perdido chimenea, Qg= kcal/kg	
comb.	
$Q_g = R_{as/c} \times C_{p_{as}} \times (T_s - T_e)$	$(B48/(1+B28)) \cdot B29 \cdot (B13 - B14)$
Cálculo de: $R_{as/c} = R_{a/c} / (1+He)$	$B48/(1+B20)$
Con % mol gases y diagrama	1.26
Ostwald, (λ)	
6. Por Diagrama de Ostwald para comb. N° 5	
Por: 100 kg aire / 23, kg O2	4.32
%C = 85	0,85
%H = 12	0.12
% S = 2.5	0.025
% o = 0.5	0,00500000
Calculo de $R_{a/c} = \lambda \times R_{a/ci}$	$B39 \cdot B50$
$R_{a/ci} = (kg\ O2/kg\ comb) \times (100kg\ aire/23,1\ kg\ O2) \times (kg\ aire/kg\ comb,)$	4,300000
Calculo de $R_{a/ci} = 4.32 \times (2,66C + 5H + S - O)$	$B49 \cdot (2,66 \cdot (2,66 \cdot B44 \cdot B45 + B45 + B46 - B47))$
7. Calor perdido, aire húmedo,,QHA	
$QHA = R_{as/c} \times H_{ex} (h_{VS} - h_{VE}), kcal/kg\ comb.$	$B48/(1+B28) \cdot B28 \cdot (B55 \cdot (B55 - B57))$
h_{VS} (kJ/kg agua), $T_S = 230\ ^\circ C$ y $P = 10\ KPa$	2977,30000000
También: h_{VS} (kcal/kg agua)	709,45000000
h_{VS} (kJ/kg agua), a la $T_e = 26.6$	2550,80000000
hac agua liq.sat $30\ ^\circ C$, en comb,kcal/kg ag	30,40000000
8. Calor perd. comb humedo, Qhc (kcal/kg	
comb.	
$Q_{hc} = H_e (h_{vs} - h_{vac})$	$B62 \cdot (B56 \cdot B678)$
Determ. humedad, $H_e = kg\ H_2O/kg\ comb.$	0,03000000
9. Calor perd. comb. incomp, Qci(kcal/kg comb.)	
$Q_{ci} = CC \times R_{VCO} \times K$	$B44 \cdot B66 \cdot B67$
Calculo $R_{VCO} = CO/(CO+CO_2)$	$B21/(B21+B20)$
$K = kcal/kg$	5634,186000
10. Calor perd (conv-radiac) Qcr=kcal/kg .	
comb	
$Q_{cr} = H_i - (Q_v + Q_g + Q_{hs} + q_{he} + Q_{ci})$	540,000000
H_i , poder calor inferior(PCI), kcal/kg comb	9902,55
11. Rendim caldra, metodo directo, η	
$\eta = Q_v / H_i$	$B31/B71$

12. Cálculo de los BHP de la caldera	
1 HP evapora a T = 100 °C, kg/h de agua	15,440
Entalpia de vaporación a 100 °C h gf	(B79-B80)
Entalpia vapor recalentado	B24
Entalpia agua líquida	B25
Para prod. masa de vapor, mv kg/h	B78*B77
Calor util: $Q_u = mv(h_v - h_a)$	B21*(N79-B80)
Calor requerido: $h_{fg} \times m$	B78*B77
BHP	B82/B83
13. Cálculo de área de calentamiento, m²	
Para 1 HP de requieren m ²	15,44000000
Superficie de calentamiento ,m ²	B87/B84

**RESULTADOS OBTENIDOS DE LAS VARIABLES
MEDIANTE LA APLICACIÓN DE HOJA DE
CÁLCULO EXCEL**

1. DATOS DE LA CALDERA PIROTUBULAR	
Masa de vapor producido, (mv= kg/h)	10000,00
Temp. descarga de vapor, (T _v , °C)	400,00
Presión descarga vapor. (P _{rv} , Kpa)	400,00
Temp. agua alimentación, (T _a , °C)	100,00
Presión agua alimentación, (P _{ag} , Kpa)	4500,00
Combustible consumido, (m _c , kg/h)	870,00
Temp. BS gases chimenea, (T _{BS} , °C)	230,00
Temp. BS aire, alimentación, (T _{BSa} , °C)	26,6
Temp. BH aire alimentación, (T _{BHa} , °C)	21
Presión atmosférica, P _a , Kpa)	101,00000000
Temp. combustible. quemador, (T _{CQ} , °C)	30,000000
Porcentaje humedad comb. (%H _p)	3,000



% volumétrico analizador de gases, mol	
% CO2 mol, 11.2	1,1200E+01
% CO mo, 1.1%	1,1000E+00
2. Por tabla de vapor de agua	
Entalpia vapor generado, hs=kcal/kg	766,38
Entalpia agua liq, alimentada, he=kcal/kg	100,04000000
3. Por carta Psicrometría aire - vapor agua	
Con TBS = 26.6 °C y TBH = 21.1 °C	
La humedad del aire HE = kg H2O/kg as	0,013600
Calor especifico del aire (Cp = Kcal/kg.K)	0,240000
4. Calor útil entreg. al vapor, Qv= kcal/kg comb.	
Qv = mv(hs - me)	7659,080460
5. Calor perdido chimenea, Qg= kcal/kg comb.	
Qg= Ras/c x Cpas x (Ts - Te)	849,628186
Cálculo de: Ras/c = Ra/c / (1+He)	17,40470718
Calculo, Ra/c	
Con % mol gases y diagrama Ostwald, (λ)	1,26000000
6. Por Diagrama de Ostwald para comb. N° 5	
Por: 100 kg aire / 23, kg O2	4,32
%C = 85	0,85
%H = 12	0,12
% S = 2.5	0,02500000
% o = 0.5	0,00500000
Calculo de Ra/c = λ x Ra/ci	17,64141120
Ra/ci = (kg O2/kg comb)x(100kg aire /23,1 kg O2) x (kg aire/kg comb,)	4,320000

Calculo de Ra/ci = $4.32 \times (2,66C+5H+S-O)$	14,00112000
7. Calor pèrdido, aire húmedo,,QHA	
QHA=Ras/c xHex(hVS - hVE), kcal/kgcomb.	100,95426354
hVS (kJ/kg agua), TS= 230 °C y P =10 KPa	2977,30000000
También: h VS (kcal/kg agua)	709,45000000
hVS (kj/kg agua), a la Te = 26.6	2550,80000000
hac agua liq.sat 30°C, en comb,kcal/kg ag	30,40000000
8.Calor pèrd. Comb. humidor, Qhc (kcal/kg comb.)	
Qhc = He (hvs - hvac)	20,37150000
Determ. humedad, He = kg H2O/kg comb.	0,03000000
9.Calor perd.comb.incomp, Qci(kcal/kg comb.)	
Qci=CC x RVCO x K	428,289749
Calculo RVCO = CO/(CO+CO2)	8,9431E-02
K=kcal/kg	5634,186000
10. Calor perd (conv-radiac)Qcr=kcal/kg comb.	
Qcr= Hi - (Qv+Qg+Qhs+qhe+Qci)	844,225842
Hi, poder calor inferior(PCI), kcal/kg comb	9902,55
11. Rendim. caldre, método directo, η	
$\eta = Qv / Hi$	0,77
12. Cálculo delos BHP de la caldera	
1 HP evapora a T = 100 °C, kg/h de agua	15,440
Entalpia de vaporación a 100 °C h gf	540
Entalpia vapor recalentado	766,380
Entalpia agua liquida	100,040000

Para prod. masa de vapor, mv kg/h	10000,000000
Calor útil: $Q_u = mv(h_v - h_a)$	6663400,00000000
Calor requerido: $h_{fg} \times m$	8332,56656000
BHP	799,68158094
13. Calculo de área de calentamiento, m²	
Para 1 HP de requieren m ²	0,50000000
Superficie de calentamiento, m ²	399,84079047
RESULTADOS	
Qv =	7659,080
Qcr	844,2258
Qci	428,2897
Qhc	20,37150000
Qha	1,010E+02
Qg	849,6282
Hi	9902,5500
BHP	799,68000000
η	0,77000000
A (m2)	399,840000



VII DISCUSIÓN

- De acuerdo a los resultados obtenidos se puede observar que las cantidades de calor que se pierden en el aire y en el combustible no son de altas cantidades. Estas cantidades se deben tener en cuenta para otros cálculos de diseño a otras calderas.
- Las pérdidas de calor por los gases de combustión que se descargan por la chimenea son cantidades mayores que se deben tener en cuenta para el diseño de la caldera, o para el balance de materia en la combustión del combustible.
- El valor del rendimiento obtenido está por debajo de lo recomendado (80%), por lo se debe realizar una mejora. Esto se puede realizar aumentando la cantidad de energía útil.
- El aire que ingresa a la caldera se puede instalar un intercambiador de calor para aumentar la energía, utilizando los gases y productos de combustión, con lo cual disminuye las pérdidas de calor por la chimenea. además mejorar el proceso de combustión.
- Al combustible se puede aumentar su temperatura de entrada mediante un intercambio de calor con los gases de escape o vapor de la caldera.
- El agua de alimentación, es el fluido que mayor se puede mejora producir, envista que el agua fría aporta casi nada de energía, se recomienda que esta debe entrar a la caldera a una temperatura aproximada de 75°C.



VIII. REFERENCIALES

1. Çengel Yunus A., Transferencia de calor. Editorial McGraw – Hill/ Interamericana. Segunda edición. Impreso en México, 2004
2. Chapman Alan J., Fundamentals de Heat Transfer. Editorial Macmillan Publishing Company. Printed in the United Status of America, 1987
3. Chavéz Bello Enmanuel Balance térmico en una caldera pirotubular
4. Raquel Calvo Sanz, “Modelado del sistema de caldera hrsg de un ciclo combinado con el simulador ecosimpro y control del modelo”, Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos, Ingeniería Industrial, tesis
5. Espinoza José y Gómez Augusto, Proceso y manufactura de una caldera piro tubular, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 1984
6. Faires 199, Hougen 1978, Martínez 2005, Moran 2000
7. Holman J. P., Transferencia de calor. Editorial McGraw – Hill / Interamericana de España S. A. U. Octava Edición, Impreso en España, 1998
8. Omar Arturo Iguarán y Duarte, Diana Milena Martínez Barrios, “Diseño y construcción de una mini caldera piro tubular, para el Laboratorio de Transferencia de calor” de la Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga
9. Andrade Juárez Gustavo, “Metodología para la evaluación de la eficiencia de calderas en el ingenio Cuatolapan”. Tesis, para obtener el título de Ingeniero Mecánico Eléctrico.



10. Kern Donald Q., Procesos de transferencia de calor. CIA. Editorial Continental. S.A. de C. V. Edición Décimo Novena, México, 1986
11. Kreith Frank, Mark S. Bohn, Principios de transferencia de calor. Editorial Thomson Learning. Sexta edición. Impreso en México, 2001
12. Lienhard John H and John H. Lienhard . Published by Phlogiston Press, Cambridge, Massachusetts, U. S. A. Third Edition. 2002
13. Mills Anthony F, Transferencia de calor, Editorial McGraw – Hill / Irwin. Impreso en Colombia 1994
14. Ocón García Joaquín, Tojo Barreiro Gabriel, problemas de Ingeniería Química. Tomo I Editorial Aguilar S. A. Madrid, España 1963
15. SENER, Balance Nacional de Energía 2005
16. Shield Carl, Calderas, tipos, características y sus funciones, Compañía Editorial Continental S.A. México 1978.
17. Spigel Murria R., Fórmulas y tablas de Matemática Aplicada. Editorial McGraw – Hill / Interamericana de España S. A. U. Segunda Edición, Impreso en España, 2005
18. Welty J.R, C.E. Wicks, R.E. Wilson, Fundamentos de transferencia de momento, calor y masa. Editorial Limusa S. A. de C.V. Primera Edición Impreso en México 1982
19. ASTM D 2156 – 94, Standard Test Method for Density in flue gases from Burning Destilate fuels-:



IX. APENDICE

a. Definiciones de términos

Caldera, equipo térmico que se utiliza para producir vapor de agua

Quemador, lugar donde se produce el encendido y quemado del combustible, produciéndose posteriormente la llama de encendido

Transferencia de calor, disciplina que estudia la energía que se transfiere de mayor a menor temperatura en los sistemas

Piro tubular, tipo de caldera por donde el fluido o gases calientes fluyen por el interior de los tubos los cuales están sumergidos en el agua

Vapor de agua, fluido que se obtiene al cambiar de estado el agua líquida debido a cambio de temperatura , es decir el agua líquida cambia de a fase vapor.

Purga, es la cantidad de agua que se descarga de la caldera como desecho para evitar la acumulación de sólidos u otros componentes.

Gases de combustión, gases que se producen por la combustión del combustible, se pueden expresar en base seca y en base húmeda.

Superficie de calefacción, Es la superficie de intercambio de calor, que está en contacto con el fluido transmisor, se considera superficie de radiación al valor de la superficie radiante del hogar y de las cámaras del hogar en las calderas piro tubulares y la proyecta de las paredes del hogar en calderas acuo tubulares. La superficie de convección vendrá dada por la superficie real bañada por el fluido transmisor correspondiente a las zonas no expuestas a la llama.



b. NOMENCLATURA

Sistema Internacional

Símbolo	Cantidad	Unidades
A,	Área de transferencia de calor	m ²
A1, A2, A3	Área de los efectos	m ²
Cp	calor específico a presión constante	J/kg ^o K
C	Capacidad térmica	J/ ^o K
d	Diámetro del tubo	m
Dh	diámetro hidráulico	m
Q	Flujo de calor total en un elemento	W
g	aceleración de gravedad	m/s ²
gc	factor de conversión de dimensiones	1 kg.m/N.s ²
G	gasto másico	kg/m ² .s
h	coeficiente de transferencia de calor	W/m ² . ^o K
i	Entalpía del aire húmedo por unidad de masa de aire seco	J/kg
i _{fg}	Calor latente de vaporización	J/kg
k	Conductividad térmica	W/m. ^o K
m	velocidad de flujo de masa	kg
M	peso molecular	g/gmol
N	número de efectos	
q	flujo de calor por unidad de área y unidad de tiempo	W/m ²
qo	calor generado por unidad de volumen	W/m ³
Q	cantidad de calor	W
R	Resistencia térmica, Rc resistencia térmica por convección	



Rk resistencia por conducción, Rr resistencia térmica por

Radiación

K/W

T

Temperatura

°K, °C

U

Coefficiente global de transferencia de calor

W/m²°K



X. ANEXOS

A1. MATRIZ DE CONSISTENCIA

A2. Diagrama de Ostwald.

A3. Esquema de un medidor de opacidad

A4 Tabla N° 7.2 Lista de Mediciones y puntos donde se efectúan las mediciones y controles en una caldera piro tubular

A5 TABLA N° 7.3 Reacciones Químicas de combustión con su energía liberada (Poder Calorífico Superior)

A5 Algoritmo para la determinación secuencial de los cálculos de las variables para el Balance térmico de la Caldera Piro tubular que se realizara mediante el la hoja de cálculo, Exel.

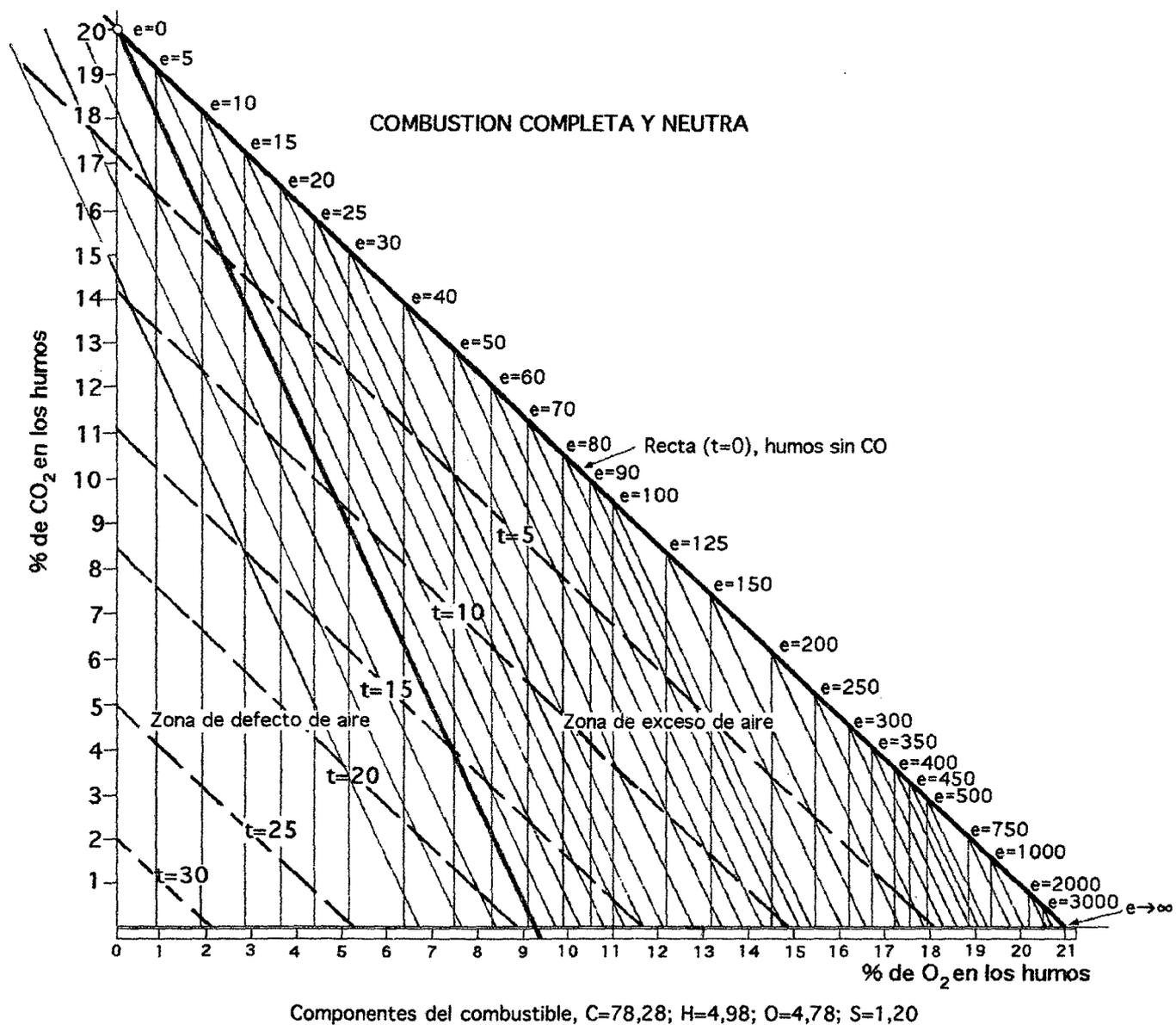
)



Proyecto de Investigación: "Balance térmico en una caldera piro tubular"

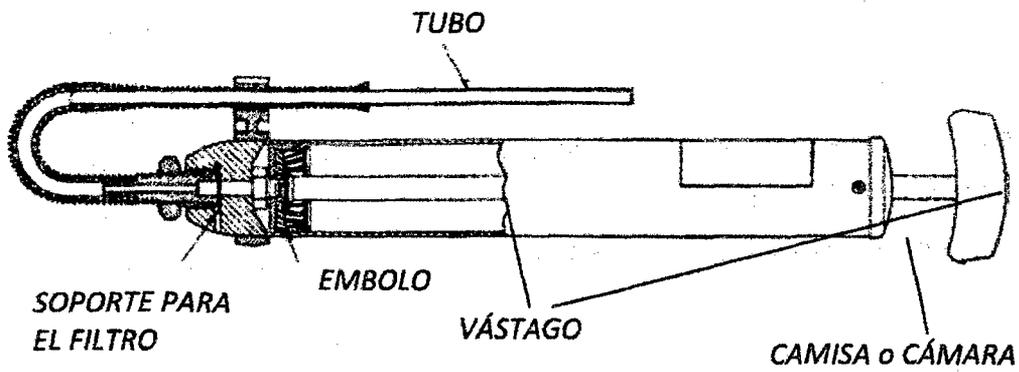
PROBLEMA GENERAL	OBJETIVO GENERAL	HIPÓTESIS GENERAL	METODOLOGÍA
<p>¿La metodología para la realización del balance térmico en la caldera piro tubular, será el más adecuado para la determinación las cantidades de calor involucrados, la capacidad de producción de vapor, la composición de los gases productos de combustión, rendimiento de la caldera?</p>	<p>Realizar el balance térmico en una caldera piro tubular</p>	<p>Los cálculos de balance térmico en una caldera piro tubular, responderán en cuanto a las características de diseño, configuración, forma, tamaño y peso, capacidad de producción de vapor, potencia, rendimiento, para su aplicación industrial.</p>	<p>El proyecto de investigación, Balance térmico en una caldera piro tubular, es una investigación aplicada, tecnológica, ubicada e campo de Ingeniería química, responde a las operaciones unitarias</p> <p>El procedimiento para la contratación de las hipótesis será el descriptivo, aplicando el método cuantitativo</p>
<p>¿La información o fuente disponible seleccionada contara con los fundamentos necesarios para realizar el Balance térmico en una caldera piro tubular?</p> <p>¿Cuáles serán las ecuaciones fundamentales para la realización del balance térmico de la caldera, y determinar capacidad de la caldera, el rendimiento, producción de vapor de agua?</p> <p>¿Se podrá realizarlos cálculos de balance térmico mediante la hoja de calculo excel.?</p>	<p>Seleccionar la información necesaria que permitan realizar el balance térmico en una caldera piro tubular</p> <p>Desarrollar un procedimiento de cálculo para el balance térmico en la caldera y determinar: la capacidad de la caldera, el rendimiento, producción de vapor de agua</p> <p>Mediante la aplicación de la hoja de cálculo (Excel), determinar las variables para la realización del balance térmico en la caldera piro tubular</p>	<p>La fuente seleccionada contara con los fundamentos teóricos que conduzcan al balance térmico de la caldera piro tubular</p> <p>El procedimiento de cálculos de balance de calor permitirá determinar capacidad, producción, rendimiento de la caldera</p> <p>Se podrá realizar mediante la hoja de calculo, excel la determinación de las variables que permita realizar el balance térmico de la caldera piro tubular</p>	<p>Las variables son las siguientes:</p> <p>Variable dependiente</p> <p>X = Balance térmico en una caldera piro tubular</p> <p>Variables independientes</p> <p>Y1 = Determinación de las cantidades de fluidos que ingresan y salen de la caldera</p> <p>Y2 = Determinación de mediciones y controles para determinación de las cantidades</p> <p>Operacionalización de las variables</p> <p>X = (Y2 , y2)</p>

A2. DIAGRAMA DE OSTWALD



Fuente : <http://Opacidad-gases.es/test.2/>

A.3 ESQUEMA DE UN OPACIMETRO, PARA LA MEDIDA DE LA OPACIDAD DE LOS GASES DE COMBUSTIÓN



Fuente :. <http://Opacidad-gases es/test.2/>

Tabla N° 7.1

Lista de Mediciones y puntos donde se efectúan las mediciones y controles en una caldera piro tubular

MEDICIÓN	LUGAR
MEDIO	AMBIENTE
Temperatura ambiente, bulbo seco Temperatura ambiente bulbo húmedo Humedad relativa presión barométrica	Área donde se localice el sistema de generación y combustión de vapor (Punto N° 9)
GENERADOR	DE VAPOR
Chimenea <ul style="list-style-type: none"> ▪ Análisis de gases ▪ Temperatura de gases de escape 	En punto de la tubería cerca a la tubería para evitar infiltraciones en ese punto (punto 2,3,o 4)
Agua alimentación <ul style="list-style-type: none"> ▪ Flujo ▪ Temperatura ▪ Presión ▪ Conductividad 	Instrumentación instalada a la descarga de bomba de agua alimentación (Punto 1 ó 10)
Vapor <ul style="list-style-type: none"> ▪ Flujo ▪ Temperatura ▪ Presión 	Instrumentación Localizada en generador, de vapor o en caseta del suministro de combustible. (Punto N° 8)
Combustible <ul style="list-style-type: none"> ▪ Flujo ▪ Temperatura 	En el tanque de día, en la descarga de la bomba del combustible, en la caseta del suministro de combustible (Punto 6, 7)
Aire <ul style="list-style-type: none"> ▪ Temperatura del aire quemadores 	Cuarto de máquinas, en los ductos de aire a la salida del calentador de aire (Punto 5)

TUBERIA, TANQUES	Y DEPÓSITOS
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Temperatura de superficie ▪ Dimensiones del equipo o tubería 	Superficie o pared del equipo, en el cuerpo del equipo
FUGAS	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Diámetro de fuga ▪ Presión del vapor fugado ▪ Temperatura de la fuga 	En el lugar detectado
PURGAS	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Temperatura ▪ Presión ▪ Flujo 	Cabezales de distribución o Instrumentación localizadas en tanques (Punto N° 11)
TRAMPAS DE	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sonido emitido por flujo de vapor ▪ Sonido emitido en el condensador ▪ Sonido por falla en trampa de vapor ▪ Temperatura, presión de trabajo 	Tubería antes de la trampa Tubería de descarga de la trampa En el cuerpo de la trampa de vapor

Fuente: Eficiencia Energética en la Generación y Distribución del vapor.



TABLA N° 7.2

Reacciones Químicas de combustión con su energía liberada (Poder Calorífico Superior)

COMBUSTIBLE	REACCION	CALOR DE COMBUSTIÒN (PCS)
Carbono a CO	$2C+O_2 \rightarrow 2CO$	2.222 kcal/kg
Carbón a CO ₂	$C+O_2 \rightarrow CO_2$	7.833 kcal/kg
CO a CO ₂	$2CO+O_2 \rightarrow 2CO_2$	2.412 kcal/kg
Hidrógeno	$H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$	33.945 kcal/kg
S a SO ₂	$S + O_2 \rightarrow SO_2$	2.211 kcal/kg
Metano	$CH_4+2O_2 \rightarrow CO_2+2H_2O$	13.264 kcal/kg
Acetileno	$2C_2H_2+5O_2 \rightarrow 4CO_2+2H_2O$	11.945 kcal/kg
Etileno	$C_2H_4+3O_2 \rightarrow 2CO_2+2H_2O$	12.020 kcal/kg
Etano	$2C_2H_6+7O_2 \rightarrow 4CO_2+6H_2O$	12.403 kcal/kg
SH ₂	$SH_2 + O_2 \rightarrow 2SO_2+ 2H_2O$	3.944 kcal/kg

Fuente: Eficiencia Energética en la Generación y Distribución del vapor.

A5 Algoritmo para la determinación secuencial de los cálculos de las se realizara mediante el la hoja de cálculo, Excel variables para el Balance térmico de la Caldera Piro tubular

