



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

DIRECCIÓN DE POSGRADOS

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO EN OPCIÓN AL GRADO ACADÉMICO DE MAGISTER EN GESTIÓN DE ENERGÍAS

TEMA:

*“EVALUACIÓN DE LOS PARÁMETROS OPERACIONALES DE LA CALDERA
PIROTUBULAR YB701C UBICADA EN LA REFINERÍA SHUSHUFINDI DE LA
EP PETROECUADOR, Y SU INFLUENCIA EN EL CONSUMO DE
COMBUSTIBLE, EN EL AÑO 2015. PROPUESTA QUE PERMITA MEJORAR
LA EFICIENCIA ENERGÉTICA”*

Autor:
Ing. Galo Alejandro Paredes Fajardo

Tutor:
PhD Enrique Torres Tamayo

LATACUNGA – ECUADOR

Mayo 2016



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

UNIDAD DE POSGRADO

Latacunga – Ecuador

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO

En calidad de Miembros del Tribunal de Grado aprueban el presente Informe en consideración de posgrados de la Universidad Técnica de Cotopaxi; por cuanto, el maestrante: Paredes Fajardo Galo Alejandro, con el título de tesis: **“EVALUACIÓN DE LOS PARÁMETROS OPERACIONALES DE LA CALDERA PIROTUBULAR YB701C UBICADA EN LA REFINERÍA SHUSHUFINDI DE LA EP PETROECUADOR, Y SU INFLUENCIA EN EL CONSUMO DE COMBUSTIBLE, EN EL AÑO 2015. DISEÑO DE UNA PROPUESTA QUE PERMITA MEJORAR LA EFICIENCIA ENERGÉTICA”** ha considerado las recomendaciones emitidas oportunamente y reúne los méritos suficientes para ser sometido al acto de Defensa de Tesis.

Por lo antes expuesto, se autoriza realizar los empastados correspondientes, según la normativa institucional.

Latacunga mayo 25, 2016.

Para constancia firman:

.....
MSc. Ángel León Segovia.
PRESIDENTE

.....
MSc. Edwin Moreano Martínez
MIEMBRO

.....
MSc. Efrén Barbosa Galarza
MIEMBRO

.....
PhD Héctor Laurencio Alfonso
OPONENTE

AVAL DEL DIRECTOR DE TESIS

Latacunga, 29 de abril del 2016

En mi calidad de Director de Tesis presentada por el Ing. Paredes Fajardo Galo Alejandro, Egresado de la Maestría en Gestión de Energías, previa a la obtención del mencionado grado académico, cuyo título es **“EVALUACIÓN DE LOS PARÁMETROS OPERACIONALES DE LA CALDERA PIROTUBULAR YB701C UBICADA EN LA REFINERÍA SHUSHUFINDI DE LA EP PETROECUADOR, Y SU INFLUENCIA EN EL CONSUMO DE COMBUSTIBLE, EN EL AÑO 2015. DISEÑO DE UNA PROPUESTA QUE PERMITA MEJORAR LA EFICIENCIA ENERGÉTICA”**.

Considero que dicho trabajo reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a la presentación pública y evaluación por parte del tribunal examinador.

Atentamente

DIRECTOR DE TESIS

RESPONSABILIDAD POR LA AUTORÍA DE LA TESIS

El contenido de la presente Tesis de Grado, es original y de mi exclusiva responsabilidad.

Atentamente

.....
Galo Alejandro Paredes Fajardo
C.I.: 1715613228

AGRADECIMIENTO

Agradezco primeramente a Dios quien me ha dado la oportunidad de la vida y de bendecirme a cada momento para lograr mis sueños; a mi familia que con su apoyo moral me ha fomentado carácter para poder culminar este proyecto, a mis profesores de la universidad que han sabido guiarme con certeza y a mis compañeros de trabajo que con su experiencia he podido plasmar en el presente documento.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo y esfuerzo, a mi esposa Gaby, a mis padres Galito y Yoly, a mis hermanos María Fernanda y Mauricio, a mi abuelita Marina que me ha cuidado de pequeño, quienes han sabido ser pacientes y me han infundado valor, fe y esperanza.

INDICE GENERAL

PORTADA.....	ii
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO	iii
AVAL DEL DIRECTOR DE TESIS	iv
RESPONSABILIDAD POR LA AUTORÍA DE LA TESIS	v
AGRADECIMIENTO.....	vi
DEDICATORIA	vii
INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO 1	6
MARCO CONTEXTUAL Y TEÓRICO DEL PROCESO DE GENERACIÓN DE VAPOR EN REFINERÍA SHUSHUFINDI	6
1.1 Antecedentes de la Investigación	6
1.2 Estado actual del proceso de generación de vapor en la refinería.....	8
1.3 Fundamento teórico.....	9
1.3.1 Calderas.....	9
1.3.1.1 Tipos de Calderas	9
1.3.2 Caldera pirotubular YB701C	11
1.3.2.1 Partes de la caldera pirotubular YB701C	12
1.3.3 Combustión: reacción básica.....	12
1.3.3.1 Tipos de combustión	13
1.3.3.2 Control de contaminantes de la combustión.....	14
1.3.4 Optimización de la combustión de caldera	15
1.3.4.1 El exceso de aire.....	15
1.3.4.2 Análisis de los gases de la combustión.	17
1.3.5 Quemador.....	17
1.3.5.1 Tipos de quemadores.....	17
1.3.5.2 Quemador de la caldera YB701C.....	18

1.3.6	Trampas de vapor	20
1.3.6.1	Trampas mecánicas	21
1.3.6.2	Trampas termostáticas	22
1.3.6.3	Trampas termodinámicas	22
1.3.7	Vapor de calderas	23
1.3.7.1	Vapor saturado	24
1.3.7.2	Vapor sobrecalentado	24
1.3.7.3	Vapor <i>flash</i>	24
1.3.8	Aislamiento térmico	24
1.3.8.1	Principales aislamientos térmicos	25
1.3.9	Agua tratada para calderas	25
1.3.9.1	Impurezas del agua de aportación y sus efectos en las calderas ..	25
1.3.9.2	Características del agua para calderas	26
1.3.10	Límites permisibles de emisiones de gases	27
1.4	Balance de energía de la caldera pirotubular YB701C	28
1.5	Fundamento legal	29
1.6	Operacionalización de las variables	29
1.7	Conclusión del capítulo	30
CAPÍTULO 2		31
METODOLOGÍA PARA EL CÁLCULO DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE LA CALDERA PIROTUBULAR YB701C		31
2.1	Toma de mediciones	31
2.1.1	Medición de las condiciones del medio ambiente	31
2.1.2	Medición de gases y temperatura de chimenea	31
2.1.3	Evaluación del combustible	32
2.1.4	Medición del oxígeno y exceso de aire en la combustión	32

2.1.5 Evaluación del agua de alimentación.....	32
2.1.6 Medición del vapor	32
2.1.7 Evaluación de la presión y temperatura del vapor	32
2.2 Procedimiento para el cálculo de la eficiencia energética para generadores de vapor.....	32
2.2.1 Método directo	33
2.2.2 Método indirecto	33
2.4. Cálculo del consumo de energía eléctrica de los equipos	39
2.4.1 Bomba de alimentación de agua tratada al deaerador.....	39
2.4.2 Bomba de alimentación de agua a caldera	40
2.4.3 Soplador de aire del quemador.....	40
2.4.4 Bomba de químicos – Secuestrante.....	40
2.4.5 Bomba de químicos –Acondicionador	40
2.5 Simulación con el uso del método de elementos finitos.	40
2.6 Procedimiento para la evaluación económica e impacto ambiental del proceso estudiado.....	41
2.7 Técnica del Chi-cuadrado para evaluación de hipótesis.	41
2.8 Métodos, técnicas e instrumentos empleados en la investigación	42
2.8.1 Modalidades de la Investigación.....	42
2.8.2 Tipos de Investigaciones	42
2.8.3 Técnicas e instrumentos	43
2.8.3.1 Equipos:.....	43
2.8.3.2 Software	46
2.9 Población y Muestra.....	46
2.10 Conclusiones del capítulo	46
CAPÍTULO 3.....	47

ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	47
3.1 Mediciones.....	47
3.1.1 Valores permisibles de las emisiones a la atmósfera de la caldera YB701C.....	47
3.1.2 Valores de las condiciones de operación	48
3.2 Cálculo de la eficiencia de la caldera.....	50
3.2.1 Rendimiento de la caldera por el Método Directo	50
3.2.2 Rendimiento de la caldera por el Método Indirecto.....	50
3.2.3 Consumo de energía actual	54
3.3 Rendimiento de la caldera.....	55
3.3.1 Quemador Webster JB3C-75	55
3.3.2 Análisis de los gases de combustión	57
3.4 Análisis de la combustión en el hogar mediante el método de elementos finitos (MEF) en condiciones iniciales	58
3.5 Mediciones de los parámetros del agua de la caldera	64
3.6 Comprobación de la hipótesis	65
3.6.1 Comprobación mediante el Chi-Cuadrado.....	65
3.6.2 Comprobación de la hipótesis de forma técnica.	67
3.7 Conclusiones del capítulo	67
CAPÍTULO 4	68
PROPUESTA DE MEJORAMIENTO PARA LA CALDERA YB701C.....	68
4.1 Título de la propuesta.....	68
4.2 Justificación.....	68
4.3 Objetivos	68
4.4 Estructura de la propuesta	69
4.5 Desarrollo de la propuesta.....	69

4.5.1 Obtención de la relación aire / gas combustible.....	69
4.5.1.1 Correlación entre aire y flujo de gas combustible.....	71
4.5.1.2 Correlación carga de la caldera y flujo de gas combustible	73
4.5.1.3 Correlación carga de la caldera y aire	74
4.5.1.4 Relación entre rendimiento de la combustión y exceso de aire ...	76
4.5.2 Composición de los gases de combustión.....	78
4.5.3 Rendimiento después de efectuado la calibración (Método Indirecto)	81
4.5.4 Interpretación de pérdidas en la caldera mediante un esquema	84
4.5.5 Ahorro energético.....	85
4.5.5.1 Ahorro energético mediante esquemas	86
4.5.6 Análisis de la combustión del quemador mediante el método de elementos finitos (MEF) en condiciones finales.....	88
4.5.7 Análisis financiero	92
4.5.7.1 Cálculo de capital para la innovación.....	92
4.5.7.2 Cálculo del TIR y VAN del proyecto de inversión	94
4.5.8 Equipo analizador Honeywell modelo Slate	94
4.5.9 Plan de monitoreo de emisiones.....	95
4.6 Conclusiones del capítulo	96
CONCLUSIONES	97
RECOMENDACIONES	99
Referencias Bibliográficas	100
ANEXOS.....	102

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Especificaciones generales de la caldera Superior.....	11
Tabla 1.2 Parámetros de control en los gases de combustión.....	15
Tabla 1.3 Relación entre exceso de aire y temperatura de la llama.....	16
Tabla 1.4 Pautas de optimización de las calderas.....	17
Tabla 1.5 Características del quemador.....	19
Tabla 1.6 Partes del quemador.....	19
Tabla 1.7 Características de las Trampas.....	23
Tabla 1.8 Impurezas del agua de aportación y sus efectos en las calderas.....	26
Tabla 1.9 Agua de alimentación para calderas.....	27
Tabla 1.10 Agua en el interior de la caldera.....	27
Tabla 1.11 Límites máximos permitidos para calderas y hornos.....	28
Tabla 1.12 Operacionalización de las variables.....	30
Tabla 2.1 Técnicas e Instrumentos.....	43
Tabla 2.2 Personal responsable de la operación de la caldera.....	46
Tabla 3.1 Valores permisibles de los gases producto de la combustión.....	47
Tabla 3.2 Mediciones de los gases producto de la combustión de la caldera.....	48
Tabla 3.3 Datos de operación de la caldera.....	49
Tabla 3.4 Condiciones ambientales.....	49
Tabla 3.5 Composición del gas combustible.....	49
Tabla 3.6 Poder calorífico neto de los combustibles.....	50
Tabla 3.7 Valores de los cálculos preliminares.....	50
Tabla 3.8 Valores de los adicionales de calor.....	51
Tabla 3.9 Emisiones de gases a la atmósfera.....	51
Tabla 3.10 Temperatura de las superficies de la caldera.....	53
Tabla 3.11 Cuantificación de las pérdidas de radiación y convección.....	53
Tabla 3.12 Valores de las pérdidas de energía en la caldera.....	54
Tabla 3.13 Consumo actual de energía.....	54
Tabla 3.14 Especificaciones del quemador JB3C-75.....	56
Tabla 3.15 Porcentaje de oxígeno (O ₂) aceptables en el quemador.....	56
Tabla 3.16 Condiciones iniciales de los flujos de gas combustible y aire.....	58
Tabla 3.17 Características del mallado.....	59

Tabla 3.18 Resumen de la simulación en condiciones iniciales	64
Tabla 3.19 Valores de los parámetros del agua de la caldera	64
Tabla 3.20 Frecuencias observadas (f_o).....	67
Tabla 3.21 Frecuencias esperadas (f_e)	65
Tabla 3.22 Determinación Chi-Cuadrado (X^2).....	65
Tabla 3.23 Valores de la prueba chi-cuadrado.....	66
Tabla 3.24 Valores conseguidos para demostración de hipótesis.....	667
Tabla 4.1 Valores conseguidos en la calibración - Gas combustible Tipo 1	70
Tabla 4.2 Valores conseguidos en la calibración - Gas combustible Tipo 2	70
Tabla 4.3 Valores de la relación aire y flujo de gas combustible Tipo 1.....	72
Tabla 4.4 Valores de la relación aire y flujo de gas combustible Tipo 2.....	72
Tabla 4.5 Valores relación carga en función del gas combustible Tipo 1	73
Tabla 4.6 Valores relación carga en función del gas combustible Tipo 2	74
Tabla 4.7 Valores relación carga en función del aire- Gas Tipo 1.....	75
Tabla 4.8 Valores relación carga en función del aire – Gas Tipo 2.....	76
Tabla 4.9 Valores de las emisiones atmosféricas después de la calibración-Gas Tipo 1	78
Tabla 4.10 Valores de las emisiones atmosféricas después de la calibración-Gas Tipo 2	79
Tabla 4.11 Comparación de las condiciones ambientales.....	79
Tabla 4.12 Valores de los adicionales de calor posterior a la calibración-Gas combustible Tipo 1.....	81
Tabla 4.13 Valores de las pérdidas de energía en la caldera posterior a la calibración- Gas combustible Tipo 1	81
Tabla 4.14 Valores de los adicionales de calor posterior a la calibración-Gas combustible Tipo 2.....	81
Tabla 4.15 Valores de las pérdidas de energía en la caldera posterior a la calibración- Gas combustible Tipo 2	83
Tabla 4.16 Datos para determinar potencial ahorro de combustible.....	86
Tabla 4.17 Condiciones de flujos de gas combustible y aire finales	88
Tabla 4.18 Resumen de la simulación en condiciones finales.....	92
Tabla 4.19 Comparación de los resultados de la simulación	92

Tabla 4.20 Valores para la investigación	93
Tabla 4.21 Valores para la adquisición del equipo	93
Tabla 4.22 Valores para la operación y mantenimiento.....	94
Tabla 4.23 Valores del TIR y VAN	94
Tabla 4.24 Plan de monitoreo y calibración de las calderas	96

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Figura 1.1	Proceso de generación de vapor	9
Figura 1.2	Caldera pirotubular	10
Figura 1.3	Caldera acuotubular	11
Figura 1.4	Partes principales de la caldera.....	12
Figura 1.5	Pérdidas en la caldera en función del exceso de aire.....	16
Figura 1.6	Quemador JB3C – Vista frontal	19
Figura 1.7	Quemador JB3C – Vista lateral	20
Figura 1.8	Piloto del quemador.....	20
Figura 1.9	Trampa balde invertido-funcionamiento	21
Figura 1.10	Trampa de flotador: a) Tipo manual b) Con venteo	22
Figura 1.11	Trampa termostática	22
Figura 1.12	Trampa termodinámica.....	23
Figura 1.13	Balance de energía.....	28
Figura 2.1	Analizador de gases	43
Figura 2.2	Cámara termográfica	44
Figura 2.3	Pinza amperimétrica	44
Figura 2.4	Multímetro	44
Figura 2.5	Sicrómetro.....	45
Figura 2.6	Cromatografo.....	45
Figura 2.7	Analizador de agua	45
Figura 3.1	Imagen termográfica de la caldera YB701C	52
Figura 3.2	Zonas de análisis de temperatura de la caldera.....	52
Figura 3.3	Dimensiones del Quemador Webster JB3C	56
Figura 3.4	Esquema del quemador y la cámara de combustión.....	58
Figura 3.5	Geometria del cuerpo.....	59
Figura 3.6	Mallado del elemento	59
Figura 3.7	Valores de las características del gas combustible y del aire	60
Figura 3.8	Inicio de la simulación.....	60
Figura 3.9	Contorno de la velocidad de la combustión.....	61
Figura 3.10	Entorno del número de Reynolds	61
Figura 3.11	Contorno de la temperatura estática en el hogar.....	62

Figura 3.12 Contorno de la viscosidad turbulenta	62
Figura 3.13 Contorno de la conductividad térmica efectiva	63
Figura 3.14 Contorno de desequilibrio de la masa.....	63
Figura 3.15 Distribución Chi-Cuadrado.....	66
Figura 4.1 Relación entre el aire y flujo de gas combustible Tipo 1	71
Figura 4.2 Relación entre el aire y flujo de gas combustible Tipo 2	72
Figura 4.3 Comportamiento de la carga en función del gas combustible Tipo 1..	73
Figura 4.4 Comportamiento de la carga en función del gas combustible Tipo 2..	74
Figura 4.5 Comportamiento de la carga en función del aire-Gas Tipo 1	75
Figura 4.6 Comportamiento de la carga en función del aire-Gas Tipo 2.....	76
Figura 4.7 Comportamiento del rendimiento de la combustión en función del exceso de aire – Gas Tipo 1	77
Figura 4.8 Comportamiento del rendimiento de la combustión en función del exceso de aire – Gas Tipo 2	77
Figura 4.9 Comportamiento emisiones atmosféricas y rendimiento combustión- Gas Tipo 1	80
Figura 4.10 Comportamiento emisiones atmosféricas y rendimiento combustión- Gas Tipo 2	80
Figura 4.11 Comparación de las pérdidas de energía en la caldera-Gas Tipo 1 ...	82
Figura 4.12 Comparación de las pérdidas de energía en la caldera-Gas Tipo 2..	83
Figura 4.13 Las pérdidas de la caldera en función del exceso de aire	84
Figura 4.14 Exceso de oxígeno en función de la carga y tipo combustible	85
Figura 4.15 Potencial ahorro de combustible.....	87
Figura 4.16 Ahorro potencia de combustible.....	88
Figura 4.17 Velocidad de la combustión.....	89
Figura 4.18 Entorno del número de Reynolds	89
Figura 4.19 Contorno de la temperatura estática en el hogar.....	90
Figura 4.20 Contorno de la viscosidad turbulenta	90
Figura 4.21 Contorno de la conductividad térmica efectiva	91
Figura 4.22 Contorno de desequilibrio de la masa.....	91
Figura 4.23 Analizador Honeywell	95

RESUMEN

La presente tesis de maestría, desea mejorar la eficiencia térmica y el rendimiento de la combustión de la caldera pirotubular YB701C de la Refinería Shushufindi como parte de la Empresa Pública (EP) PETROECUADOR. Para ello se sistematizaron los fundamentos básicos, las teorías, las normativas y los sistemas generales de los procesos de generación de vapor. Posterior se detalló la metodología a seguir para la determinación de la eficiencia térmica y el rendimiento de la combustión de la caldera. Luego se discute la eficiencia del equipo conseguido en condiciones iniciales, que se refiere a la situación que estaba atravesando la caldera antes de efectuar la optimización. Posterior se efectuó el análisis y control de los parámetros operacionales de dos tipos de gases combustibles que poseen distintas características, que intervienen en la combustión, con lo que logró mejorar la eficiencia térmica de la caldera mediante la optimización de la combustión, en base a parámetros ideales; el carburante que se efectuó el estudio, fue el gas natural, debido a que representa costos bajos para la operación. Posterior mediante el programa ANSYS se determinó el estado de la combustión en el hogar del generador de vapor. Finalmente se estableció dos curvas, que representa a los dos tipos de gases combustibles, de lo cual con el gas combustible tipo 1 se consiguió incrementar la eficiencia de la caldera y de la combustión en 8,42 % y 4,2 % respectivamente; y con el gas combustible tipo 2 se alcanzó incrementar la eficiencia de la caldera y de la combustión en 6,96 % y 4,5 % correspondientemente. Se consideró la implementación de un analizador de gases en línea el cual controlaría los parámetros de operación y con estos los valores límites de las emisiones a la atmósfera, donde el periodo de recuperación de la inversión sería de 4 años.

Palabras claves: Eficiencia, caldera, combustión

ABSTRACT

This thesis of masters, tries to improve the thermal efficiency and combustion performance of the fire-tube boiler YB701C of the Refinería Shushufindi as a part of (EP) PETROECUADOR Public Company. For it, fundamental basics, theories, the regulations and the general systems of steam generation processes are systematized. Therefore, it was detailed the methodology to be followed for the determination of the thermal efficiency and combustion performance of the fire-tube boiler. Later it discussed the efficiency of the appliances in the initial conditions, which refers to the situation of the boiler before it started the optimization. Afterwards, it was carried out the analysis and control of the operational parameters of two types of fuel gases with different characteristics, involved in the combustion, which managed to improve the thermal efficiency of boiler by combustion optimization, based on ideal parameters; the oxidizer studied that was performed, was the natural gas, since it represents low our costs of the operations. Later, through the program ANSYS was determined the combustion status of the steam in home generators. Finally, it established two types of fuel gases, with the fuel gas type 1 it was able to increase the performance of the boiler and the combustion in 8,42 % and 4,2% respectively; and the second fuel gas type 2 reached to increase the performance of the boiler and the combustion in 6,96 % and 4,5 % accordingly. The implementation of an on line gas analyzer which would control the operation parameters and with these limit values of emissions into the atmosphere, where the recovery period of inversion of 4 years would considered.

INTRODUCCIÓN

Este proyecto de investigación fue enfocado a mejorar la eficiencia energética de una de las calderas de la Refinería Shushufindi, el cual es un generador de vapor saturado de baja. Esta tesis se divide en cuatro capítulos que abordan lo siguiente:

El marco contextual y teórico que se establece en este capítulo uno es de suma importancia, ya que se conoce de investigaciones actuales e innovadoras, que son de utilidad para cumplir el objetivo de este proyecto de investigación.

En el capítulo dos, se efectuó el procedimiento para el cálculo del rendimiento energético de la caldera pirotubular de 149 kW; se indican las pautas para la simulación y la demostración de la hipótesis. El objetivo fue identificar claramente los procedimientos a seguir, para la obtención del mejoramiento energético.

En este capítulo tres se obtienen los valores de las condiciones de la operación de la caldera, mediante los distintos equipos, instrumentos de medición y la solución de ecuaciones, entre la información relevante que se consiguió esta: las características del combustible, la composición química de los cantidades de los gases de combustión, el rendimiento térmico, consumo de energía y el comportamiento de la combustión en el cámara del hogar.

Como propuesta en el capítulo cuatro, se establece para dos tipos de gases combustibles que poseen diferentes características químicas, las curvas de la relación aire y gas combustible a diferentes cargas de generación de vapor, que conlleva a una disminución en el consumo de combustible y conseguir mejorar las condiciones de las emisiones de los gases a la atmosfera. La posibilidad de innovación de un nuevo analizador de gases para la caldera.

Situación problémica

En el mundo se utilizan las calderas como un medio para obtener energía, en este caso vapor, el cual se emplea principalmente en instalaciones como: la industria petrolera, la generación de electricidad a través de un ciclo Rankine, en edificios, hospitales y termoeléctricas.

La Refinería Shushufindi como parte de la Empresa Pública (EP) PETROECUADOR, está ubicada en la provincia de Sucumbíos, está conformada por tres plantas: Refinería Amazonas 1, Refinería Amazonas 2 y Planta de Gas. Las Refinerías procesan un total 1590 m³/d (10 000 bpd) cada una, dando un total de 3180 m³/d (20 000 bpd), los

derivados que se obtienen son: crudo reducido, gasolina base, diesel, jet fuel y gas. La Planta de Gas, genera como promedio 300 toneladas de GLP por día.

Entre los equipos importantes de las refinerías de esta empresa se encuentran las calderas piro-tubulares, las cuales generan vapor saturado de baja presión en el sistema, el que se emplea para diferentes usos:

- ✓ Intercambio de calor en la zona de convección de los hornos, con la finalidad de elevar su temperatura y entregarlo a la torre de destilación donde se obtienen los derivados del crudo.
- ✓ Mantener la temperatura del residuo y fuel oil en los tanques de almacenamiento, para su posterior traslado con bombas API.
- ✓ Para conservar una temperatura óptima en las tuberías de procesos, para bombeo, en lo que respecta al transporte del residuo y fuel oil.
- ✓ Para la transferencia de calor en los intercambiadores.
- ✓ Conservar una temperatura adecuada en los sellos de las bombas de crudo.
- ✓ Así mismo para liberación (limpieza) de equipos y tuberías que en lo posterior se someterán a mantenimientos y reparaciones.

Se cuenta con tres calderas, las cuales son:

1.- La caldera YB701A (1986) no se considera para el estudio, debido a su capacidad limitada de producción de vapor saturado que es de 2000 kg/h (4400 lb/h) y además por su tiempo de vida útil.

2.-La caldera YB701B (2013), la cual tienen una capacidad operativa de generar vapor saturado de 3136,36 kg/h (6900 lb/h), es el equipo más nuevo en donde no se presenta mayores dificultades en su funcionamiento

3.- La caldera YB701C (2010) con la misma capacidad operativa que la anterior 3136,36 kg/h (6900 lb/h), pero no es la realidad ya que genera menor cantidad de vapor comparado con la caldera YB701B, debido a:

- ✓ La concentración de hollín que se forma en el hogar y tuberías internas de la caldera, debido a la mala combustión (combustible-aire), el cual provoca disminución en el rendimiento del equipo;
- ✓ Pésima combustión para la generación de vapor;
- ✓ Fugas de vapor por: empaques, compuertas, trampas de vapor y válvulas;

- ✓ Dámper defectuoso que regula el ingreso del aire al quemador para la respectiva combustión, el exceso de aire provoca una reducción notable en la eficiencia energética de la caldera;
- ✓ Mirilla fisurada por donde escapa flujo de calor;
- ✓ El agua que recibe la caldera para generar vapor es controlado por dispositivos, una mala calidad de este producto, podría provocar incrustaciones y oxidación, lo que también refleja pérdida en la eficiencia térmica;
- ✓ Deterioro del aislamiento;
- ✓ Purgas no contraladas que provocan disminución de temperatura para la transformación del agua en vapor;
- ✓ Concreto refractario fisurado que provoca pérdidas térmicas en el proceso de la generación de vapor.

Por los antecedentes antes expuestos, se ve la necesidad de efectuar el estudio y análisis con el fin de mejorar la eficiencia energética de la caldera pirotubular YB701C.

Justificación de la investigación

La caldera pirotubular YB701C al cotejar con la caldera YB701B, muestra deficiencia energética en la generación de vapor saturado de baja presión, en base a las referencias mencionadas en la sección anterior pueden ser motivos de:

- ✓ Mayor consumo de combustible;
- ✓ Impacto a la seguridad y el medio ambiente;
- ✓ Costos extras de mantenimiento y operación.

El insuficiente conocimiento, limita las causas primordiales que provoca esta insuficiencia energética, es por eso que mediante la evaluación de los parámetros operacionales y la propuesta aplicada al objeto de estudio de la investigación, se pretende conseguir el incremento de la eficiencia energética de la caldera pirotubular YB701C, siendo un beneficio económico, social y ambiental, para la empresa.

Formulación del problema de la investigación

¿Cómo inciden los parámetros operacionales de la caldera pirotubular YB701C, de la Refinería Shushufindi, en el consumo de combustible y la eficiencia energética del proceso, durante el año 2015?

Objeto de estudio de la investigación

La caldera pirotubular YB701C de la Refinería Shushufindi - EP PETROECUADOR

Campo de Acción

Eficiencia energética del proceso de producción de vapor en la caldera pirotubular YB701C de la Refinería Shushufindi.

Objetivo General

- ✓ Evaluar la incidencia de los parámetros operacionales de la caldera pirotubular YB701C, de la Refinería Shushufindi, en el consumo de combustible y la eficiencia energética del proceso, durante el año 2015.

Hipótesis

Es posible la reducción del consumo de combustible y el incremento de la Eficiencia energética del proceso de producción de vapor en la caldera pirotubular YB701C, de la Refinería Shushufindi mediante el establecimiento de los parámetros operacionales y el estado técnico de la misma.

Objetivos Específicos

- ✓ Determinar las limitaciones de los trabajos precedentes relacionados con los procesos de Eficiencia energética en calderas y sus particularidades al ser aplicadas al objeto de estudio.
- ✓ Establecer un procedimiento que permita la evaluación de los principales indicadores de Eficiencia en calderas pirotubulares, su incidencia en el consumo específico de combustible y la generación de vapor.
- ✓ Valorar de forma económica y ambiental el proceso de producción de vapor en calderas pirotubulares y propuesta de acciones que permita mejorar la Eficiencia energética de la misma.

Sistema de tareas:

A.1 Exponer un sistema cognitivo actualizado sobre calderas pirotubulares.

A.2 Actualizar el estado del arte en relación con las teorías y los parámetros de operación de la caldera pirotubular YB701C.

B.1 Establecer un procedimiento para la obtención de los parámetros operacionales que permitan el análisis de la Eficiencia energética de la caldera mediante:

- ✓ Obtención de la información mediante equipos de inspección predictiva, tales como: analizador de gases, cámara termográfica, multímetros y pinza amperimétrica;

- ✓ Toma de datos en campo de los instrumentos de medición: Flujómetros, manómetros y termómetros;
- ✓ Determinación de las características de los gases combustibles, mediante cromatografías.
- ✓ Balance termo-energético que permita delimitar las condiciones de funcionamiento del equipo.

C.1 Valorar la viabilidad económica de la propuesta, mediante las técnicas: TIR y VAN.

C.2 Evaluar la información ambiental, entre los datos conseguidos del analizador de gases y la normativa vigente.

Métodos de investigación

Observación

Se efectúa la observación del área de calderería y en especial la caldera objeto de estudio, con el fin de obtener importante información.

Sistémico

Para la sistematización de la teoría fundamental de los procesos de combustión, de intercambio térmico y pérdidas térmicas, que resulta necesario para la determinación de la Eficiencia energética de la caldera.

Deductivo

En base al estudio del arte, el empleo de instrumentos, el conocimiento teórico y de normativas se puede llegar a solucionar los problemas en el equipo y de esta forma plantear una propuesta.

Analítico

Se explicarán los efectos que ocurren en el sistema y con ello llegar a una explicación lógica para solucionar los problemas y de esta manera pretender mejorar la Eficiencia energética de la caldera pirotubular.

Alcance de la investigación

La presente investigación tiene como propósito plantear un procedimiento, mediante un análisis de los parámetros operacionales del sistema, con lo cual se pretende mejorar la Eficiencia energética de la caldera pirotubular YB701C, lo que significaría para la empresa un beneficio tanto en lo económico, ahorro de recursos energéticos, en lo social y el medio ambiente.

CAPITULO 1

MARCO CONTEXTUAL Y TEÓRICO DEL PROCESO DE GENERACIÓN DE VAPOR EN REFINERÍA SHUSHUFINDI

1.1 Antecedentes de la Investigación

En la Guía Básica de Calderas Industriales Eficientes (Garrido, 2012) manifiesta que el quemador es uno de los componentes más críticos de la caldera industrial, ya que generan emisiones de gases contaminantes. Quiere decir que seleccionando un quemador adecuado se puede reducir las emisiones de óxidos nitrosos (NO_x).

Además indica que con un quemador de sistema multi-flama, patentado por el fabricante Weishaupt consigue reducir los niveles de NO_x hasta lo mínimo, en base a los siguientes principios:

- ✓ Recirculación internamente de los gases producto de la combustión;
- ✓ Reducción de la concentración parcial de O_2 ;
- ✓ Reducción de la temperatura de la llama;
- ✓ Reparto de combustible con distintos inyectores (primario y secundarios);
- ✓ Vaporización del combustible líquido finamente pulverizado.

Una pérdida de eficiencia del 1% puede ser el resultado de un aumento del 2% en exceso de oxígeno o aproximadamente 28°C (50°F) de aumento de la temperatura del gas de combustión de salida. (Lipták *et al.*, 2006).

El rendimiento de la caldera depende de dos factores (Testo, 2010):

- ✓ Rendimiento de la combustión, que se refiere a la cantidad de energía total generada en la cámara debido al proceso de combustión y
- ✓ Rendimiento del equipo, referente a su diseño y funcionamiento.

Entre las propuestas para el ahorro energía es importante destacar la de Esquerria (1988), el mismo fundamenta lo siguiente:

- ✓ Mejorar las condiciones en que se realiza la combustión con el objeto de disminuir las pérdidas por productos no quemados (aparición del humo, hollín y monóxido de carbono); sin embargo, tal mejora no debe hacerse usando demasiado aire.
- ✓ Evítase el uso de combustibles con agua en exceso.
- ✓ Ajustar los parámetros de la combustión reduciendo el exceso de aire y mejorando el rendimiento, empleando la mínima relación aire/combustible compatible con la

ausencia de problemas en los equipos. A esta conclusión han llegado la mayoría de autores.

- ✓ Evitar las variaciones de caudal y presión del combustible al quemador. La finalidad mantener la temperatura en el interior del equipo.
- ✓ Limpiar regularmente los tubos de humos y demás superficies de intercambio en contacto con los gases de combustión. El objetivo es el de obtener un buen intercambio de calor y evitar la sobrecarga al quemador, para llegar a una temperatura y carga de vapor ideal.

Las boquillas del quemador son muy importantes para garantizar la eficiencia de la combustión, además de ser amigable con el medio ambiente. Se encuentran dentro de la cámara de combustión de la caldera, por lo que está sometido a un régimen agresivo, caracterizado por la alta turbulencia, temperatura y gases corrosivos. Su función es el de realizar la atomización del combustible, que consiste en pulverizar en partículas finas o nieblas, con un movimiento dinámico de rotación para buscar la mezcla íntima entre las pequeñas partículas y el oxígeno del aire, favoreciendo de esta manera la reacción de la combustión. Hay que prestar atención a este dispositivo, ya que la mayoría de boquillas no logran gotas de partículas inferiores a $80\ \mu$, valores que empiezan a favorecer una combustión ineficiente. Se admite como buen atomizador aquel que produce más del 85 % de las gotas con diámetro inferior a $50\ \mu$ (Domínguez, 2013).

Para mejorar la combustión, se busca disminuir las pérdidas por combustión incompleta que se asocian con la presencia de CO , H_2 y C_xH_y en los gases de escape de la chimenea. (Golato *et al.*, 2005)

En el Manual práctico de operador de calderas los autores (Sanz *et al.*, 2014) revelan que la recuperación de condensados parcial o total, permiten incrementar el rendimiento energético de un generador de vapor, los condensados son agua a alta temperatura (calor sensible) y sin sales (si no hay contaminaciones o no hay arrastres de agua de caldera al vapor). La recuperación de condensados es importante para:

- ✓ El consumo menor de agua depurada.
- ✓ Disminución de la salinidad del agua de alimentación.
- ✓ Reducción del régimen de purgas a aplicar a la caldera.

- ✓ Elevación de la temperatura del agua de alimentación, lo que repercute en una reducción del consumo de combustible y en un menor contenido de gases disueltos como el oxígeno.
- ✓ Reducción de los aditivos dosificados.
- ✓ Posibilidad de reducir el tamaño de la planta desmineralizadora de agua, abaratando la inversión y reduciendo gastos de funcionamiento.

En la recuperación de calor de condensados, el agua de alimentación de la caldera, debe estar hasta su punto ebullición, con el fin de eliminar el oxígeno (O₂) y el dióxido de carbono (CO₂), que pueden provocar daños severos a las partes internas de la caldera, debido a la formación de corrosión (CONNUE,2009).

Una búsqueda bibliográfica revela que hasta el 55% de vapor de agua en algunas plantas se pierde a través de las trampas de vapor (Kanyarusoke *et al.*, 2012)

1.2 Estado actual del proceso de generación de vapor en la refinería

El agua de aportación para la caldera proviene del río Shushufindi, la que primero ingresa a un sistema de tratamiento de agua en el que incluye una desmineralizadora, posterior pasa al tanque de almacenamiento, seguidamente el agua tratada es bombeada al deareador (equipo que saca el oxígeno O₂) en donde es calentada a una temperatura estimada de 90 °C y luego inmediatamente ingresa a las calderas a una temperatura promedio de 70 °C; entre los químicos adicionales que se suministran al deareador y a la caldera está el secuestrante y acondicionador respectivamente, que son de utilidad para cumplir con especificaciones del agua para la operación de los equipos antes indicados. Los generadores de vapor producen vapor saturado de baja presión, el cual es enviado por tuberías aisladas hacia los diferentes destinos: hornos de crudo, tanques de almacenamiento, intercambiadores, bombas, torre atmosférica y para mantener una temperatura caliente en tuberías de transporte de crudo y residuo. El gas residual que se utiliza para la combustión en la caldera, proviene de la Planta de Gas (Figura 1.1).

La generación de vapor en la refinería es algo crítico, ya que actualmente se tiene complicaciones en la operación de estos equipos, es así que en los meses de abril a julio del 2015 se operaba con dos calderas y no se podía disponer de la caldera más antigua debido a la rotura en las tuberías por donde circulan los gases producto de la combustión, además se tiene presencia moderada de hollín en el interior, el aislamiento térmico de las tuberías no se encuentran en buenas condiciones, fugas por trampas de

vapor, taponamiento en la línea de entrada de gas a la caldera por presencia de azufre, exceso de monóxido de carbono en las emisiones atmosféricas.

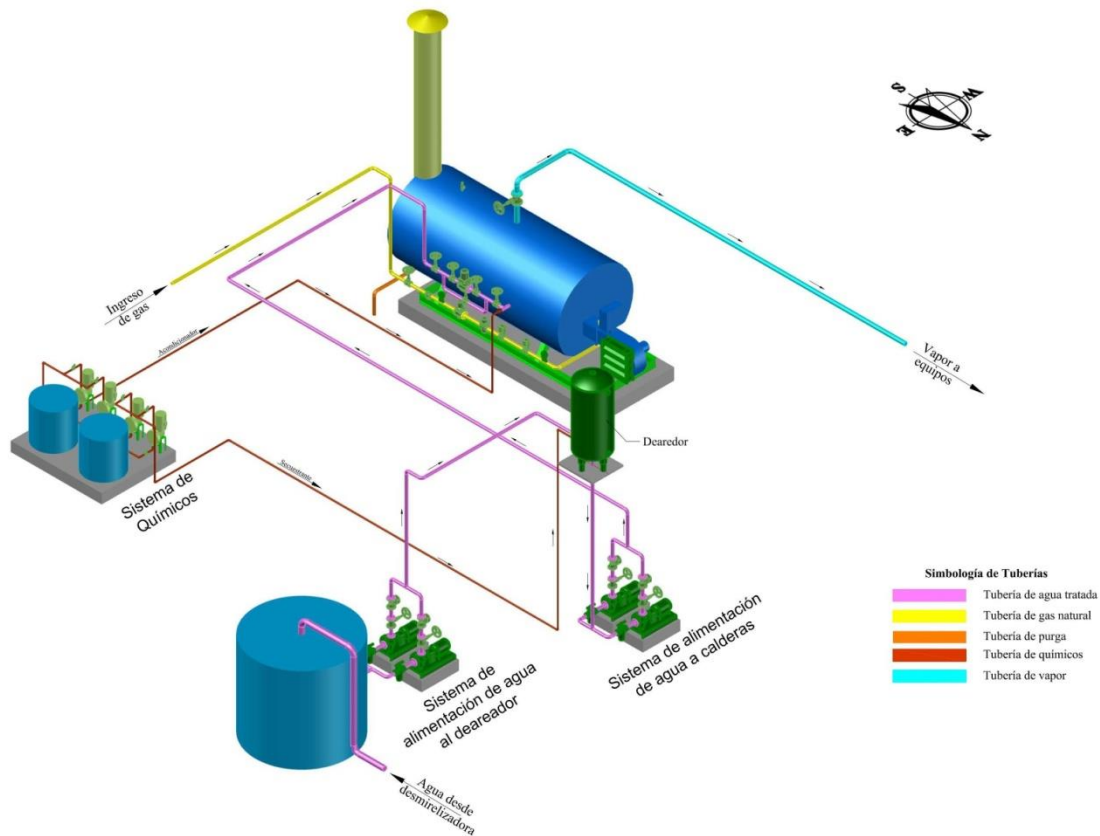


Figura 1.1 Proceso de generación de vapor

1.3 Fundamento teórico

1.3.1 Calderas

Una caldera es un equipo el cual aporta calor por medio de la combustión, el cual transmite a un fluido que generalmente es agua, que se vaporiza o no (según la temperatura y presión de diseño) y se transporta a un equipo o sistema consumidor en el que se cede esa energía.

1.3.1.1 Tipos de Calderas

Las normas como la UNE9002 Y UNE9003, indican la clasificación de las calderas vapor y de agua sobrecalentada (Sanz *et al.*, 2014).

Según la disposición de los fluidos:

- ✓ Calderas de tubos de humo (pirotubulares).
- ✓ Calderas de tubos de agua (acuotubulares).

Según la disposición de los tubos de las calderas:

- ✓ Calderas de tubos horizontales.
- ✓ Calderas de tubos inclinados.
- ✓ Calderas de tubos verticales.

Según la disposición del hogar con respecto a la caldera:

- ✓ Calderas de hogar interior.
- ✓ Calderas de hogar exterior.

Según la implantación de la caldera:

- ✓ Calderas estacionarias o terrestres.
- ✓ Calderas móviles (locomotoras, marinas).

La clasificación más trascendental, es de acuerdo a la disposición de los fluidos, los cuales se describen a continuación:

1. Calderas piro-tubulares

Se denominan calderas piro-tubulares (Figura 1.2), a un recipiente de acero cilíndrico o semicilíndrico, donde el combustible que se quema en el hogar da lugar a la transmisión de calor por radiación y los gases resultantes se les hace circular a través de los tubos, los que constituyen un haz tubular en la caldera, cuyo exterior esta bañado por el agua de la caldera. Según sea una o varias las veces que los gases pasan a través del haz tubular; se tienen de uno o de varios pasos; una vez realizado el intercambio térmico, los humos son expulsados al exterior a través de la chimenea (Sanz *et al.*, 2014).

Estas calderas son de bajo costo, mantenimiento económico y capacidad para soportar fluctuaciones bruscas de carga. Este tipo de calderas generan vapor de baja hasta 10,5 kg/cm² y alta hasta 20 kg/cm².

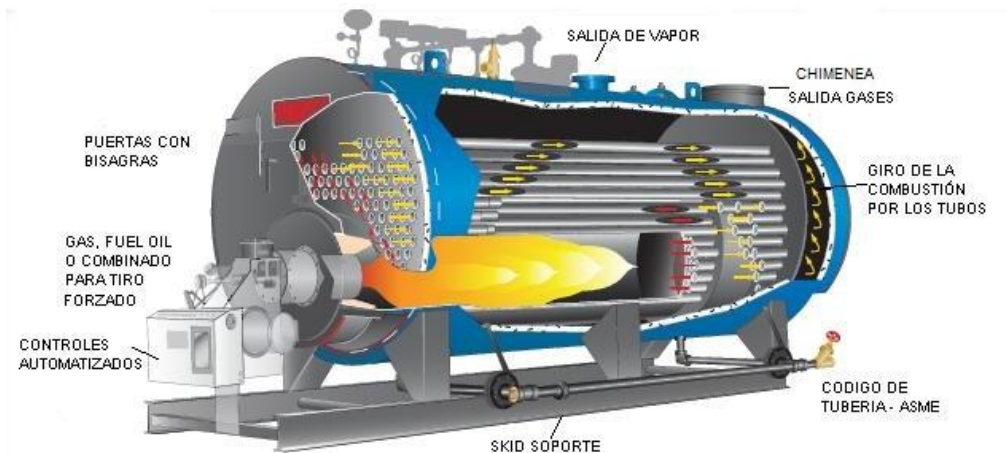


Figura 1.2 Caldera piro-tubular

Fuente: <http://www.hurstboiler.com/boilers>

2. Calderas acuotubulares

El diseño de las calderas acuotubulares es al contrario de las piro tubulares, debido a que los gases de combustión circulan por la parte externa de los tubos, mientras que el agua pasa por el interior de los tubos el cual se convierte en vapor.

Las calderas acuotubulares poseen un amplio rango de producción de vapor, los cuales varían desde un pequeño modelo compacto (Figura 1.3) hasta uno grande como son las calderas de centrales termoeléctricas (Ganapathy, 2015).



Figura 1.3 Caldera acuotubular

Fuente: <http://www.foodtechinfo.com/>

1.3.2 Caldera piro tubular YB701C

Esta caldera piro tubular, fue construida e instalada en Refinería Shushufindi en el año 2010, sus propósitos principales son: calentamiento del crudo en los hornos; para mantener a una temperatura de 80 °C en los tanques de residuo; para transferencia de calor en intercambiadores; para el calentamiento de las tuberías de transporte de productos hidrocarbúricos y para limpieza de equipos y tuberías.

A continuación las especificaciones generales de la caldera:

Tabla 1.1 Especificaciones generales de la caldera Superior

ESPECIFICACIONES GENERALES	
Potencia	149 kW (200 hp)
Superficie de calentamiento	95,5 m ² (1029 ft ²)
Presión de trabajo máxima disponible (MAWP)	1379 kPa (200 psi)
Flujo de vapor en la salida máx.	3136,36 kg/h (6900 lb/h)
Tipo combustible	Gas natural/Diesel

Fuente: Manual de la caldera (2010)

1.3.2.1 Partes de la caldera pirotubular YB701C

Entre las partes principales de la caldera Superior (Figura 1.4), se tiene:

- | | |
|---|--------------------------|
| 1. Identificación de la caldera | 10.Hogar |
| 2.Chimenea | 11.Deflectores |
| 3.Compuertas posteriores | 12.Compuertas delanteras |
| 4.Soplador | 13.Chimenea |
| 5.Quemador | 14.Orejas para izar |
| 6.Dámper para ingreso de aire | 15.Aislamiento térmico |
| 7.Controladores de seguridad | 16.Válvulas de seguridad |
| 8.Tren de gas, incluye válvulas de corte, manómetros, termómetros | 17.Codos de los tubos |
| 9.Skid soporte | 18.Tubos de conducción |

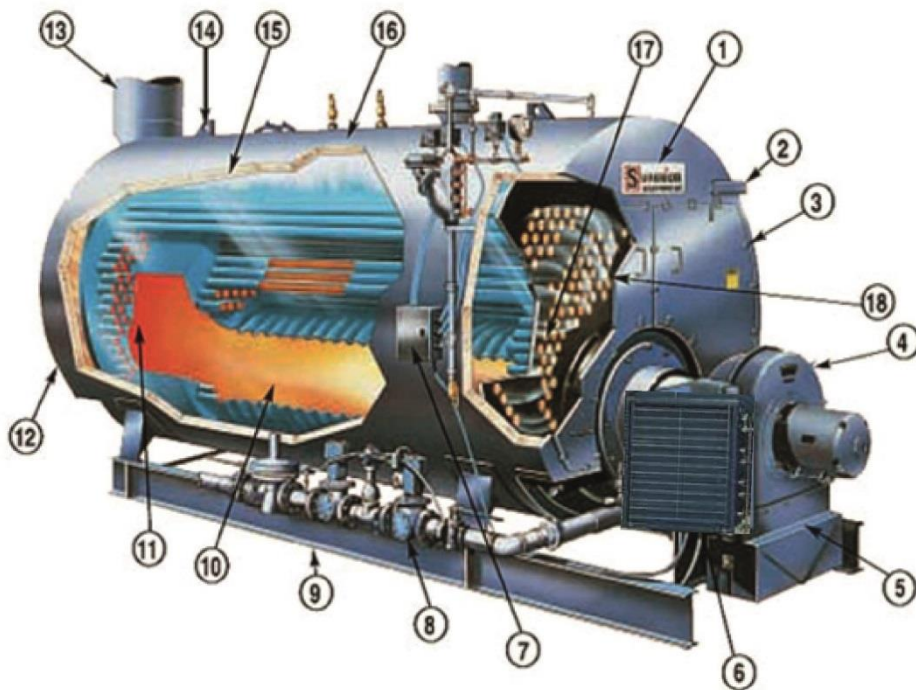


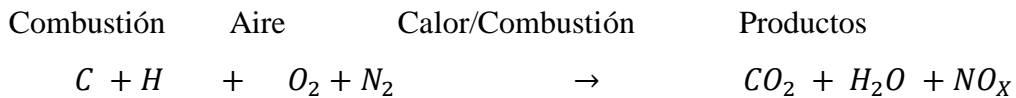
Figura 1.4 Partes principales de la caldera

Fuente: <http://www.ciscoboiler.com/>

1.3.3 Combustión: reacción básica

En el proceso de combustión se producen varias reacciones químicas, dependiendo del tipo de combustible y de los dispositivos que intervienen. Cuando se quema el hidrocarburo, el hidrógeno de este se mezcla con el oxígeno del aire para formar agua, así mismo el carbón se combina con el oxígeno del aire para convertirse en dióxido de

carbono (CO₂). En la práctica algunas moléculas de nitrógeno se combinan con el oxígeno (O₂) para formar óxidos de nitrógeno (NO_x).



1.3.3.1 Tipos de combustión

El tipo de combustión depende del nivel de combustión conseguido y el flujo de comburente (oxígeno) que contribuye para la combustión (Domínguez, 2012).

A continuación los diferentes tipos de combustiones:

1. Combustión completa

Es aquella reacción donde el combustible se quema al máximo posible, en la cual no habrá presencia de combustibles en los humos.

En este tipo de combustión se puede encontrar: N₂, CO₂, H₂O y SO₂

2. Combustión incompleta

Es aquella reacción donde el combustible no se oxida completamente, en la cual habrá presencia de sustancias, conocidas como inquemados, que son productos que pueden seguir oxidándose.

En este tipo de combustión se puede encontrar sustancias contaminantes a la atmósfera como: H₂, C_nH_m, H₂S y C

3. Combustión teórica o estequiométrica

Es aquella reacción donde el combustible se oxida completamente, con una cantidad teórica de oxígeno (O₂), en la cual no habrá presencia de O₂ en los gases producto de la combustión en la chimenea.

4. Combustión con exceso de aire

Es aquella reacción donde el combustible se quema completamente, con una cantidad elevada de aire comparada a la estequiométrica, en la cual habrá presencia de oxígeno (O₂) en los gases de la chimenea y pérdidas de calor en el vapor producido, debido a la reducción de temperatura de la combustión y a la longitud de la llama, lo cual conlleva a una menor rendimiento.

5. Combustión con defecto de aire

Es aquella reacción donde el combustible no se oxida completamente, debido a la insuficiencia de aire aportado, lo cual no cubre lo necesario para la combustión, en la que habrá presencia de inquemados en los gases de la chimenea.

1.3.3.2 Control de contaminantes de la combustión

Las regulaciones ambientales está dirigida a reducir las emisiones de dióxido de azufre (SO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x), dióxido de carbono (CO₂), el mercurio, compuestos orgánicos volátiles (COV), partículas, opacidad en la chimenea, aguas residuales y otros contaminantes de gases de efecto invernadero.

Los óxidos nitrosos (NO_x), dióxido de carbono (CO₂), partículas y la opacidad se ven influidas considerablemente por el diseño de la caldera, el funcionamiento y control. Sin embargo, la reducción o eliminación de algunos de estos contaminantes del gas de combustión a menudo deben llevarse a cabo entre la caldera y la chimenea. (Lipták *et al.*, 2006)

1. Estrategia reducción de dióxido de azufre (SO₂) y partículas

Para disminución de la formación de dióxido de azufre (SO₂) se realiza a través del sistema de desulfuración de gases de combustión, que se pueden clasificar en dos categorías básicas: depuradores húmedos (wet scrubbers) y depuradores secos (dry scrubbers).

2. Estrategia reducción de óxidos de nitrógeno (NO_x) y partículas

Los óxidos de nitrógeno (NO_x), se forman a temperaturas mayores de los 1650 °C, donde las moléculas de oxígeno (O₂) y nitrógeno (N₂) se disocian y se forman átomos libres que reaccionan entre sí.

Para minimizar la formación de NO_x, se hace reduciendo la temperatura de la llama, el exceso de oxígeno, o quemar combustibles que contienen bajo nitrógeno. Existen tres categorías tecnologías principales para reducir este contaminante, como son:

- 1) Procesamiento de pre-combustión.- Sustitución de combustibles.
- 2) Modificaciones de la combustión.- Incluyen, pero no se limitan a: reducción de potencia, modificación sistema de quemador, quemadores de bajo NO_x y la inyección de diluyente.
- 3) El procesamiento de post-combustión.- Las principales técnicas de procesamiento post-combustión incluyen la reducción catalítica selectiva (temperatura óptima de empleo, de los gases de chimenea de 315 °C a 400 °C) y la reducción no catalítica selectiva (temperatura óptima de empleo, en los gases de chimenea a 1010 °C).

1.3.4 Optimización de la combustión de caldera

El objetivo de la optimización es maximizar la eficiencia de la caldera, provocando variaciones en las condiciones de carga, combustible, ambiente y condiciones de la caldera. Cuando el costo anual de combustible de la caldera es de miles, con pocos puntos porcentuales de mejora de la eficiencia, justifican los costos de los instrumentos y controles adicionales. (Lipták *et al.*, 2006). Los objetivos de optimización incluyen:

- ✓ Minimizar el exceso aire y la temperatura de los gases de combustión
- ✓ Reducir al mínimo la presión de vapor
 - Reducir las presiones de descarga de la bomba de alimentación
 - Reducir la pérdida de calor a través de paredes de la tubería
- ✓ Minimizar purga
- ✓ Medir la eficiencia
 - Utilice las calderas más eficientes
 - Saber cuándo realizar el mantenimiento
- ✓ Proporcionar rendición de cuentas
 - Monitorear de pérdidas
 - Recuperar el calor condensado

1.3.4.1 El exceso de aire.

El exceso de aire, se relaciona con la cantidad de aire necesaria para la combustión, que debe ser un valor superior a la estequiométrica.

El exceso de aire depende de:

- ✓ El tipo de combustible a utilizar
- ✓ Las características del combustible y su preparación
- ✓ Las condiciones ambientales
- ✓ Las especificaciones del quemador
- ✓ Porcentajes de carga

A continuación el detalle de los parámetros a controlar en las emisiones de la caldera:

Tabla 1.2 Parámetros de control en los gases de combustión

Combustible	Oxígeno (O₂) (%)	Exceso de aire mínimo (%)
Gas natural	0,6 a 3	3 a 15
Fuel-oil 2 (diésel)	1,5 a 3	7 a 15

Fuente: Testo, 2010

Consecuencias del incremento del exceso de aire:

- ✓ La temperatura en la llama se reduce;
- ✓ La velocidad de transferencia de calor en los tubos y hogar de la caldera disminuye;
- ✓ Por lo tanto la temperatura de los gases a la salida aumenta

Como el exceso de aire tiene su influencia en la temperatura de la llama, se tiene que cuanto más exceso de aire se tenga en la cámara de combustión menor será la temperatura de la llama que sale del quemador de la caldera.

A continuación las siguientes particularidades:

Tabla 1.3 Relación entre exceso de aire y temperatura de la llama

Exceso de aire	Temperatura ° C / (° F)		
	Gas Natural	Propano	Fuel oil#2
0 %	1871 (3400)	2083 (3700)	2093 (3800)
25%	1593(2900)	1074 (3100)	1760 (3200)
50%	1371 (2500)	1424 (2600)	1538 (2800)
75%	1260 (2300)	1260 (2300)	1316 (2400)
100 %	1093 (2000)	1093(2000)	1204 (2200)

Fuente: Boiler Plant and Distribution System Optimization Manual, 2015

Las pérdidas de la caldera se pueden delinear como función del exceso de aire (Figura 1.5).

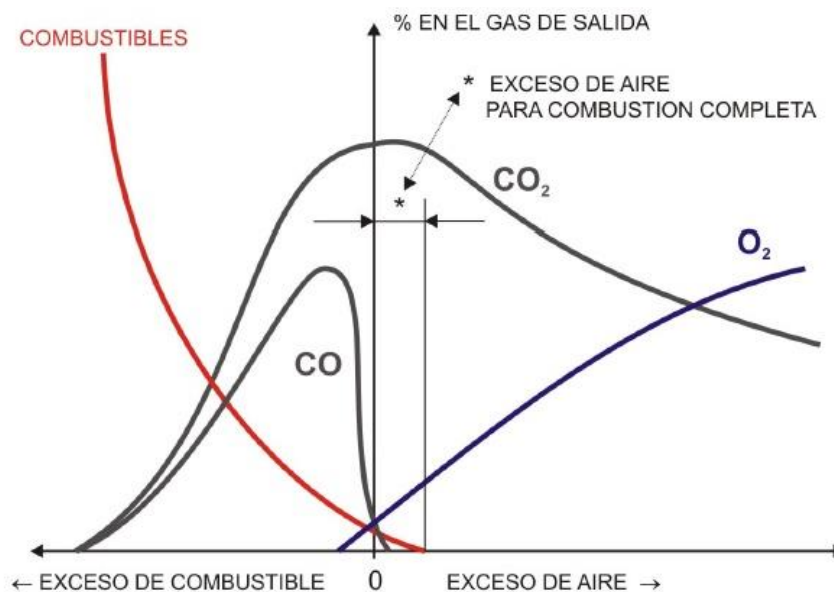


Figura 1.5 Pérdidas en la caldera en función del exceso de aire

Fuente: Process Control and Optimization, 2006

1.3.4.2 Análisis de los gases de la combustión.

Para optimizar la combustión de la caldera, se debe analizar los compuestos que salen en los gases de combustión por la chimenea, para lo cual se verificará los siguientes parámetros:

- ✓ El Oxígeno como parámetro individual para control de la combustión,
- ✓ El monóxido de carbono (CO) como índice de control de la combustión,
- ✓ Revisión entre la combinación del porcentaje oxígeno y las partículas por millón (ppm) del monóxido de carbono (CO),
- ✓ Inspección basada en el porcentaje de oxígeno (O₂) y porcentaje de opacidad

A continuación se muestra algunas pautas para mejorar la eficiencia en una caldera:

Tabla 1.4 Pautas de optimización de las calderas

Valores del análisis	Causa	Solución
CO Alto y O ₂ Bajo	Cantidad insuficiente de aire para la combustión	Ampliar la apertura de compuerta del dámper para el paso de aire al quemador.
CO Bajo y O ₂ Alto	Exceso de aire	Disminuir la apertura de compuerta del dámper para el paso de aire al quemador.
CO Alto y O ₂ Alto	Mezcla aire combustible inadecuada	Desmontar inyectores, para limpieza o sustituir de ser necesario. Regular apertura de aire (dámper).
Temperatura del cuerpo mayor que la temperatura ambiente	Desperfectos en el aislamiento	Reemplazar aislamiento
Temperatura de gases mayor a 230°C	Intercambio de calor inadecuado	Limpieza interna de la caldera o instalación de un economizador de calor

Fuente: Disminución de costos energéticos IRCE

1.3.5 Quemador

El quemador es el elemento donde inicia la combustión, mediante la inflamación del combustible y la regulación de la llama. La combustión depende de cómo está preparada el combustible (Sanz *et al.*, 2014)

1.3.5.1 Tipos de quemadores

Se clasifican de acuerdo al tipo de combustible que manejan y por el tipo de atomizado, Por la gran variedad de quemadores, se puede clasificar también de la siguiente manera:

a. Quemadores por el tipo de combustible:

- Combustibles gaseosos.
- Combustibles líquidos.
- Combustibles sólidos.
- Combustibles mixtos

b. Quemadores por su forma constructiva:

- Compacto
- No compacto

c. Quemadores por la forma de preparación del combustible:

- Para combustibles gaseosos.
- Para combustibles sólidos.
- Para combustibles líquidos:
 - o De gasificación
 - o De pulverización:

d. Quemadores por la forma de regulación:

- Automáticos
- Manuales
- Semiautomáticos

e. Quemadores por el tipo de encendido:

- Manual
- Automático: Eléctrico, Gas y Líquido

f. Quemadores por la aportación de aire al combustible:

- Aportación de tiro natural
- Aportación artificial por dispositivos mecánicos
- Aportación artificial por dispositivos dinámicos

1.3.5.2 Quemador de la caldera YB701C

El quemador como parte principal de la caldera, puede emplear un combustible a la vez, puede utilizar gas ó diésel; este dispositivo no es compacto, es de regulación automática, de encendido automático y la aportación de aire es con dispositivos dinámicos como el ventilador.

Entre las características técnicas más relevantes se tiene:

Tabla 1.5 Características del quemador

Parámetro	Unidad	Valor
Consumo máximo del quemador al utilizar Gas	kWh (scfh)	3077 (10500)
Consumo máximo del quemador al utilizar Diésel	m ³ /h (gph)	0,28 (75)
Diámetro del tubo del tren de gas	cm (in)	7,62 (3)
Motor del quemador	kW (hp)	5,59 (7,5)
Motor de la bomba diésel	kW (hp)	0,56 (0,75)

Fuente: <http://www.webster-engineering.com/>

A continuación las partes principales del quemador Webster JB3:

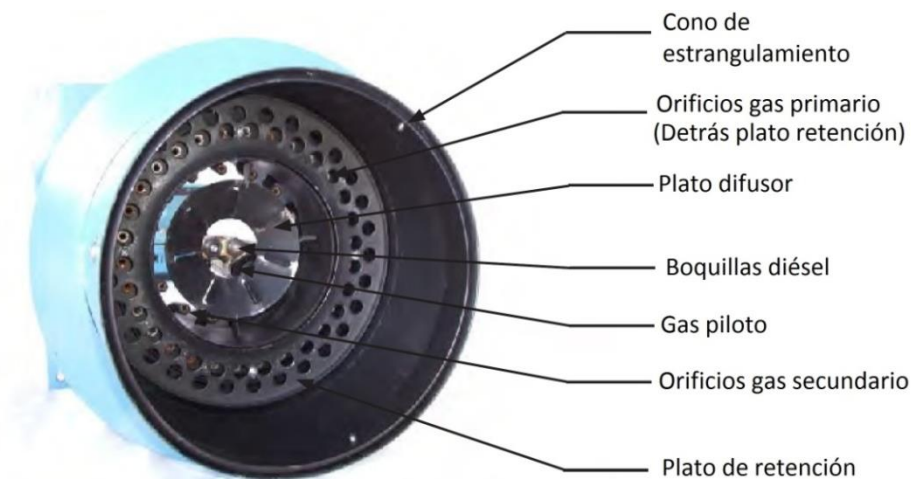


Figura 1.6 Quemador JB3C – Vista frontal

Fuente: <http://www.webster-engineering.com/>

Las partes del quemador se detalla en la Tabla 1.6.

Tabla 1.6 Partes del quemador

Descripción	Cantidad	Unidad
Cono de estrangulamiento	1	un.
Orificios gas primario	24	un.
Plato difusor	1	un.
Boquillas de diésel	2	un.
Orificios del aire secundario	48	un.
Gas piloto	1	un.
Orificios gas secundario	24	un.
Plato retención	1	un.

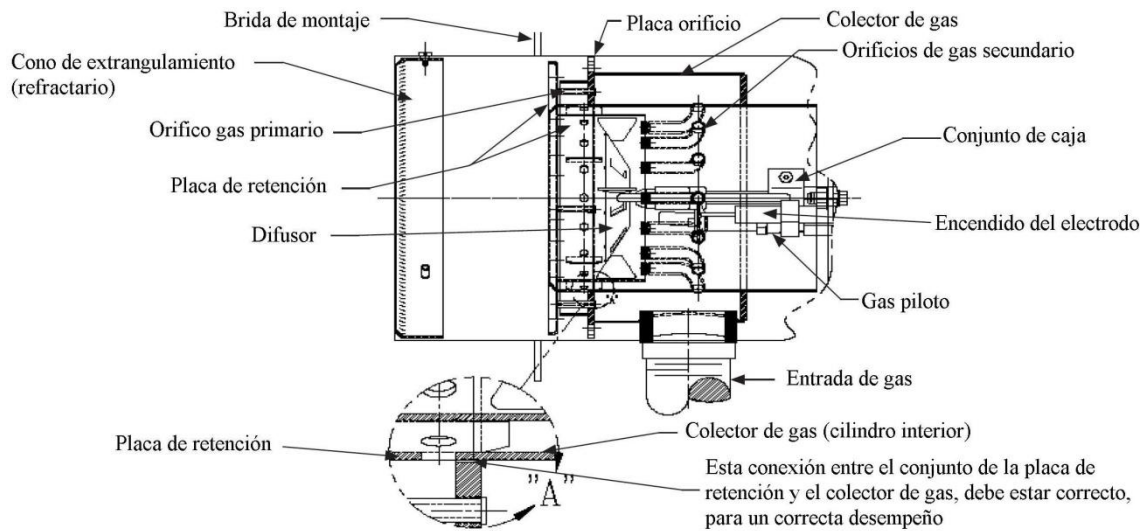


Figura 1.7 Quemador JB3C – Vista lateral

Fuente: <http://www.webster-engineering.com/>

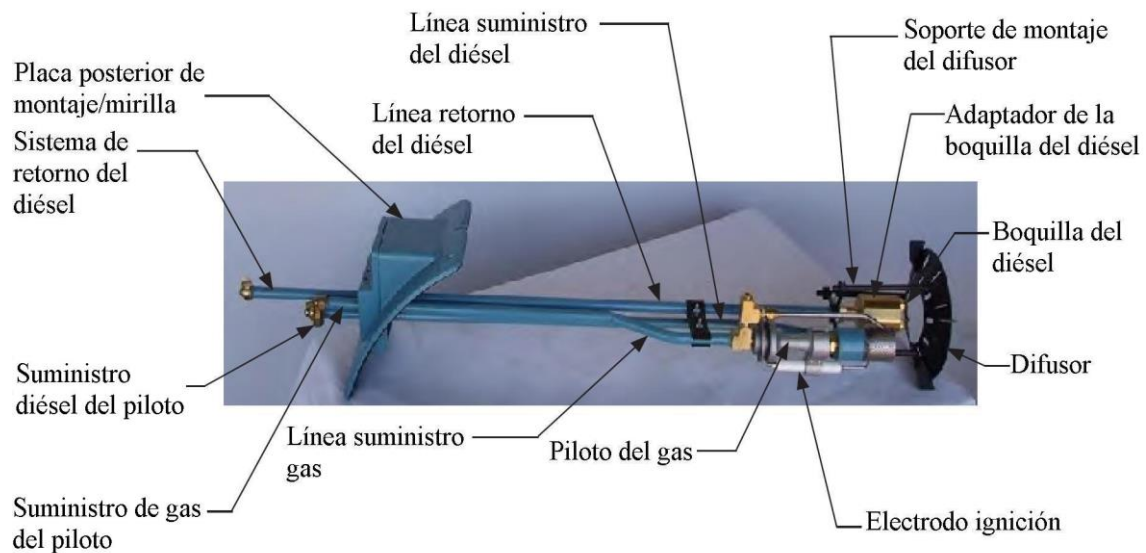


Figura 1.8 Piloto del quemador

Fuente: <http://www.webster-engineering.com/>

1.3.6 Trampas de vapor

Es una válvula automática, cuyo fin es atrapar o retener el vapor, dejando salir a condensados, aire y gases no condensables (CONNUE, 2009).

Existen tres tipos de trampas de vapor, tomando como base su principio de operación. A continuación el detalle de cada una de ellas:

1.3.6.1 Trampas mecánicas

El principio de operación está basado en la diferencia de densidades del vapor y del condensado (CONNUE, 2009).

1. Balde invertido

Este tipo de trampa emplea una especie de balde invertido, el cual opera con el principio de la diferencia de las densidades del vapor y la del condensado, a medida que asciende el balde invertido por el condensado va abriendo una válvula, pero con la presencia del vapor el balde invertido baja y cierra la válvula.

Las pérdidas son menores, cuando la condición de carga es baja. Esto debido a las pérdidas de vapor a través de la válvula de venteo.

La trampa no debe ir aislada, ya que puede ir afectando lentamente su operación al provocar inundaciones (CONNUE, 2009).

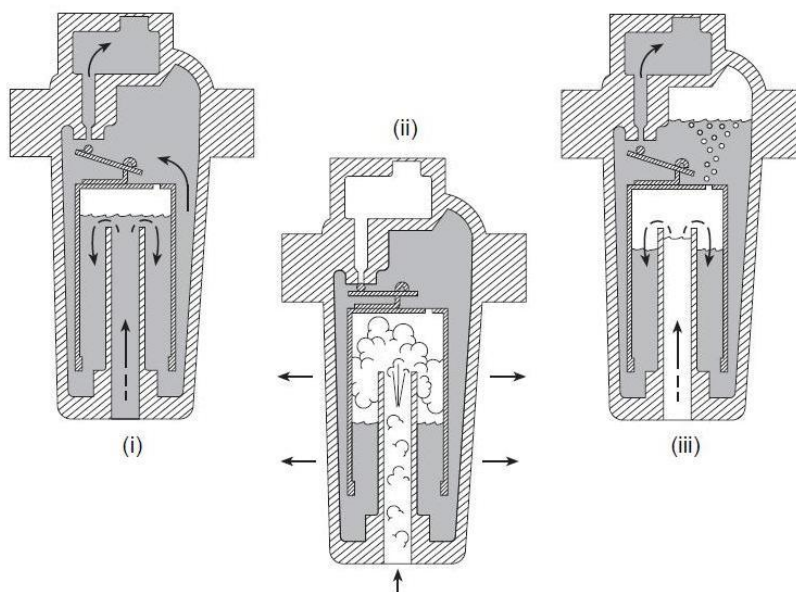


Figura 1.9 Trampa balde invertido-funcionamiento

Fuente: <http://www2.spiraxsarco.com/>

2. Trampa tipo flotador

En este tipo de trampa hace que el condensado haga elevar la boya, separando la válvula de su asiento y soltando el condensado, este opera normalmente inundada y nunca pasara agua ni aire, los purgadores modernos usan un eliminador termostático de aire; la trampa es grande y pierde calor por radiación.

Este componente debe ir aislada para su buen funcionamiento (CONNUE, 2009).

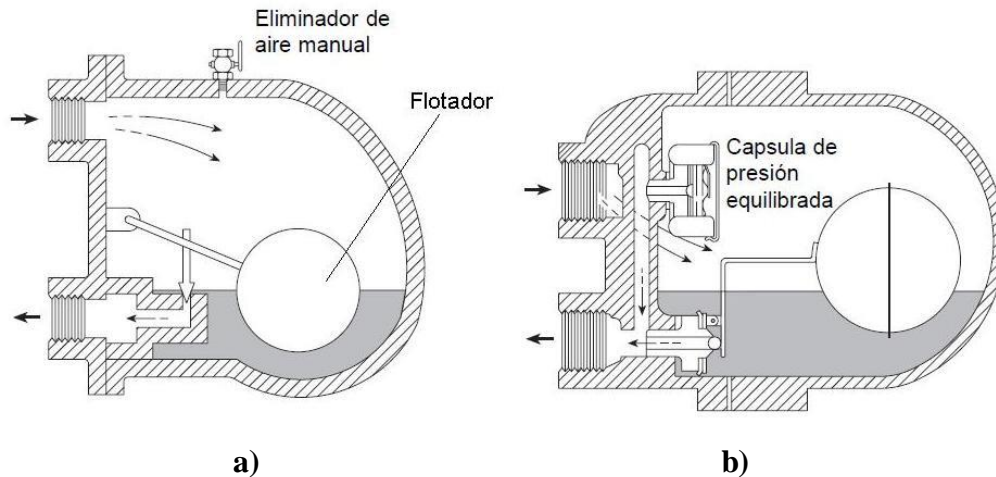


Figura 1.10 Trampa de flotador: a) Tipo manual
b) Con venteo, eliminador de aire termostático

Fuente: <http://www2.spiraxsarco.com/>

1.3.6.2 Trampas termostáticas

El principio de operación está fundamentado por la diferencia de temperaturas entre el vapor y el condensado (CONNUE, 2009).

El aislamiento total o parcial provoca retrasos en la purga de condensados, dando lugar a inundaciones en los equipos (CONNUE, 2009).

En la siguiente figura se expone una trampa de este tipo. Un componente relleno de aceite se expande cuando se calienta con el fin de cerrar la válvula en el asiento, el cual se ajusta de acuerdo a la temperatura de descarga que uno requiere, que comprende entre 60°C y 100°C, la que hace que se elimine buenas cantidades de condensado y aire en operación. (Spirax Sarco, 1999).

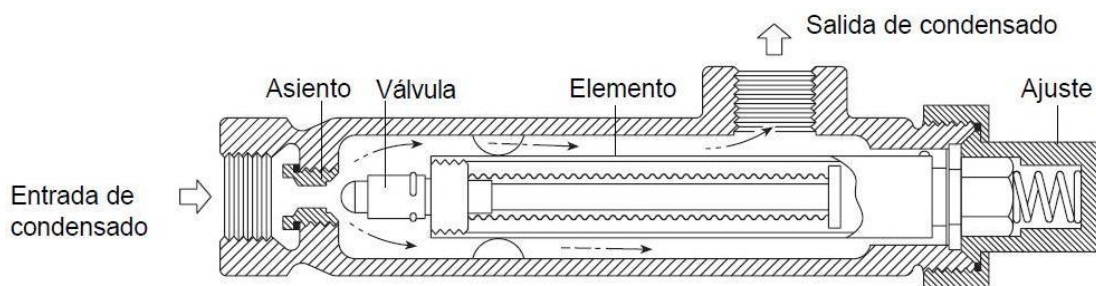


Figura 1.11 Trampa termostática

Fuente: <http://www2.spiraxsarco.com/>

1.3.6.3 Trampas termodinámicas

La primicia de operación está basada en el estado de cambio que sufre el condensado (CONNUE, 2009).

Es de construcción robusta y funcionamiento sencillo. La presión del condensado eleva el disco, provocando descarga de condensados y aire, el revaporizado que se forma sobre el disco y la velocidad hacen que asiente nuevamente el mismo y nuevamente se repite el ciclo.

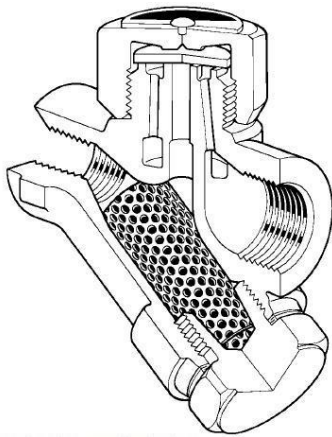


Figura 1.12 Trampa termodinámica

Fuente: <http://www2.spiraxsarco.com/>

A continuación en la Tabla 1.7 se indica un resumen de las características de las principales trampas de vapor:

Tabla 1.7 Características de las Trampas

TIPO DE TRAMPA	CARACTERÍSTICAS						
	Presión del proceso	Tipo de descarga	Fuga de vapor vivo en operación	Eliminación de aire y gases NC	Tiempo de vida ¹	Trabajo con suciedad	Resistencia a golpes de ariete
Balde invertido	Constante	Intermitente	NO	Baja	6 a 8 años	Aceptable	Malo
Flotador y Termostática	Modulante	Continua	NO	Excelente	3 a 5 años	Malo	Excelente
Termodinámica	Constante/Modulante	Intermitente	Probable	Buena	6 a 12 meses	Malo	Malo
Bimetálica	Constante/Modulante	Intermitente	NO	Excelente	3 a 5 años	Malo	Malo
Termostática	Constante/Modulante	Intermitente	NO	Excelente	3 a 5 años	Malo	Malo

Nota 1: El tiempo de vida de una trampa depende del dimensionamiento, selección y por la instalación.

NC: no condensables

Fuente: CONNUE (2009)

1.3.7 Vapor de calderas

El vapor se forma al calentar el agua hasta el punto de ebullición y esta se convierte en vapor.

A continuación se exponen los tipos de vapor:

1.3.7.1 Vapor saturado

Al empezar la ebullición, el incremento de temperatura se detiene hasta que se evapora todo el líquido, la presión se mantiene constante durante el proceso de cambio de fase y la temperatura también, en la mitad de la línea de evaporación contiene cantidades iguales de líquido y vapor, cualquier cantidad de pérdida calor del vapor, hará que se condense, el vapor que está en el punto de condensarse se llamará vapor saturado (Cengel, 2011).

1.3.7.2 Vapor sobrecalentado

Al estar en estado de vapor saturado, se le transfiere más calor a este, dará como resultado un aumento de temperatura y volumen específico, esto quiere decir que es un vapor que contiene mayor temperatura y menor densidad que el vapor saturado en una misma presión. Un vapor que no está a punto de condensarse (es decir, no es vapor saturado) se denomina vapor sobrecalentado (Cengel, 2011).

1.3.7.3 Vapor *flash*

El vapor flash se genera en la expansión de los condensados de alta temperatura y presión, el que es producido en el depósito de revaporización. Esto se puede apreciar en la salida de las trampas de vapor (Sanz *et al.*, 2014).

1.3.8 Aislamiento térmico

El aislamiento térmico es un material que tienen como finalidad evitar flujo de calor por conductividad a través de ellos. Este aislamiento térmico a la vez es cubierto con láminas de aluminio las cuales protegen de las condiciones climáticas, de los químicos y también para protección del hombre, evitando irritación de los ojos, piel y vías respiratorias.

Las cualidades más importantes:

- ✓ Ahorro de energético
- ✓ Protección pasiva contra incendios
- ✓ Prevención de la condensación y la oxidación
- ✓ Garantizar la seguridad del personal, equipos y estructura
- ✓ Mitigar la contaminación ambiental
- ✓ Optimización y control del sistema de proceso

1.3.8.1 Principales aislamientos térmicos

Entre los primordiales aislamientos se tiene (ISOVER; Margarida, 1983; Jutglar, 2011):

- ✓ **Lana de roca mineral:** Procesado a partir de rocas en estado líquido, la que está constituido de finas fibras inorgánicas, caracterizada por su resistencia al fuego, baja conductividad térmica y amplia absorción acústica. Capacidad para resistir temperaturas picos de $-270\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta $750\text{ }^{\circ}\text{C}$. Sus fibras son cortos y pesadas por lo que necesitan un mallado metálico para mantener su integridad. Su conductividad térmica está entre $0,03461$ a $0,03605\text{ W/m}\cdot\text{K}$ por cada $38\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- ✓ **Fibra cerámica:** Es un material que resiste altas temperaturas. La temperatura de operación está comprendido entre $1260\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta $1650\text{ }^{\circ}\text{C}$. Su conductividad térmica está entre $0,05769$ a $0,06346\text{ W/m}\cdot\text{K}$ por cada $38\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- ✓ **Espuma de vidrio (foamglass):** Este material se fabrica a partir de materiales tales como: la arena, carburo de silicio y anhídrido bórico, se forma a altas temperaturas y su enfriamiento es en varias etapas. La temperatura de operación está comprendido entre $-250\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta $430\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tiene una densidad de 130 a 180 kg/m^3 . Su resistencia a la compresión de 7 a 9 kg/cm^2 . Su conductividad térmica está entre $0,05769$ a $0,06346\text{ W/m}\cdot\text{K}$ por cada $38\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- ✓ **Silicato de calcio:** Este material fabricado con silicato hidratado de calcio. La temperatura de operación hasta $1050\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tiene una densidad de 180 a 230 kg/m^3 . Su conductividad térmica de $0,04323\text{ W/m}\cdot\text{K}$ por cada $90\text{ }^{\circ}\text{C}$.

1.3.9 Agua tratada para calderas

El agua para calderas debe tener su tratamiento, con el fin de proteger la parte interna del equipo, sus tuberías y accesorios contra corrosión e incrustación. La eficiencia térmica y energética puede verse afectada; por lo que es necesaria una inspección periódica (por lo menos una vez al año).

Las consecuencias que origina el descuido en el tratamiento de agua, normalmente repercuten en altos costos de mantenimiento y combustible así como en el consecuente desgaste prematuro del equipo.

1.3.9.1 Impurezas del agua de aportación y sus efectos en las calderas

El agua de aportación más el agua de recuperación de condensados, posee ciertas impurezas las cuales causan los siguientes efectos en las calderas:

Tabla 1.8 Impurezas del agua de aportación y sus efectos en las calderas

Impureza	Fórmula	Estado	Efectos
Dióxido de carbono	CO ₂	Gas	Corrosión
Oxígeno	O ₂	Gas	Corrosión
Sólidos en suspensión	MES	Sólidos no disueltos	Depósitos, espumas y arrastres en el vapor
Materia orgánica	MO	Sales disueltas y sólidos no disueltos	Depósitos, espumas y arrastres en el vapor
Aceite		Coloidal	Depósitos, espumas y arrastres en el vapor
Acidez	H ⁺		Corrosión
Dureza	Ca ⁺⁺ , Mg ⁺⁺	Sales disueltas	Incrustaciones
Alcalinidad			Espumas y arrastres en el vapor, desprendimiento del CO ₂ , fragilidad cáustica
Salinidad (STD-sólidos totales disueltos)	CO ₃ ²⁻ , CO ₂ , H ⁺ , OH ⁻	Sales disueltas	Depósitos, espumas y arrastres en el vapor
Sulfatos	SO ₄ ²⁻	Sales disueltas	Aumento de salinidad con Ca ⁺⁺ , forma incrustaciones muy duras
Cloruros	Cl ⁻	Sales disueltas	Aumento de salinidad y corrosividad
Sílice	SiO ₂	Sales disueltas o coloidal	Incrustaciones y depósitos sobre instalaciones
Hierro, Manganeseo	Fe, Mn	Sales disueltas o insolubles	Depósitos
Cobre	Cu	Sales disueltas o insolubles	Depósitos y corrosión

Fuente: Manual práctico del operador de calderas industriales (2014)

1.3.9.2 Características del agua para calderas

El agua para calderas debe cumplir con normativas, en este caso como referencia se toma a la norma española UNE-EN 12953-10, que para la aplicación en calderas pirotubulares, se maneja con dos grupos de presiones con respecto al agua de alimentación, estos son:

- ✓ >0,5 a 20 bar
- ✓ >20 bar

En este caso se está dentro del primer grupo (>0,5 a 20 bar), con una presión de promedio de 1,52 bares de alimentación de agua tratada a las calderas.

A continuación los parámetros del agua de alimentación para calderas:

Tabla 1.9 Agua de alimentación para calderas

Parámetro	Unidad	Agua de alimentación para calderas de vapor	Agua de relleno para calderas de agua caliente
Presión de servicio	bar	>0,5 a 20	Intervalo total
Conductividad directa a 25°C	μS/cm	<6000	
pH	-	10,5 a 12	>7,0
Dureza total	mmol/l	<0,01	<0,05
Concentración de hierro (Fe)	mg/l	<0,3	<0,2
Concentración de cobre (Cu)	mg/l	<0,05	<0,1
Concentración de sílice (SiO ₂)	mg/l		-
Concentración de oxígeno (O ₂)	mg/l	<0,05	-
Concentración de aceite/grasa	mg/l	<1	<1

Fuente: Manual práctico del operador de calderas industriales (2014)

A continuación se detalla el agua en el interior de la caldera en la que se incluye los condensados más agua nueva de aportación:

Tabla 1.10 Agua en el interior de la caldera

Parámetro	Unidad	Agua de alimentación de conductividad >30μS/cm	Agua de alimentación de conductividad ≤30μS/cm
Presión de servicio	Bar	>0,5 a 20	>0,5
Apariencia	-	Clara, sin espuma estable	
Conductividad directa a 25°C	μS/cm	<6000	<1500
Valor del pH a 25°C	-	10,5 a 12	10 a 11
Alcalinidad compuesta	mol/l	1 a 15	0,1 a 1
Concentración de sílice (SiO ₂)	mg/l	<10	<10
Fosfato (PO ₄ ³⁻)	mg/l	10 a 30	6 a 15

Fuente: Manual práctico del operador de calderas industriales (2014)

1.3.10 Límites permisibles de emisiones de gases

Según Acuerdo Ministerial 091 se establece los límites máximos permisibles de emisiones en hidrocarburos en el Ecuador, publicado en Registro Oficial No. 430, el 4

de enero del 2007, se tiene los siguientes límites permisibles para emisiones de calderas, hornos y calentadores, en Refinería Shushufindi:

Tabla 1.11 Límites máximos permitidos para calderas y hornos

CONTAMINANTE	TIPO DE COMBUSTIBLE		
	GLP (mg/Nm ³) _A	DIESEL (mg/Nm ³) _A	CRUDO (mg/Nm ³) ^A
Material Particulado (MP)	N.A	150	150
Óxidos de Carbono (CO)	N.A	50	50
Óxidos de Nitrógeno (NOx)	400	550	550
Óxidos de Azufre (SO ₂)	30	1650	1650
HAP'S	0,1	0,1	0,1
COV'S	5	10	10

A) Expresado al 7% de O₂ en condiciones normales y en bases seca.

mg/Nm³: Expresado como miligramos de contaminante por metro cubico de gas seco y referido a condiciones normales de temperatura y presión.

Fuente: Acuerdo Ministerial 091

1.4 Balance de energía de la caldera pirotubular YB701C

El balance energético de una instalación es la información fundamental, la cual permite apreciar correctamente el rendimiento térmico de un proceso, en el que es posible valorar las pérdidas de calor que pueden producirse.

Es una comparación entre las energías que ingresan al sistema versus las energías y pérdidas que salen del mismo.

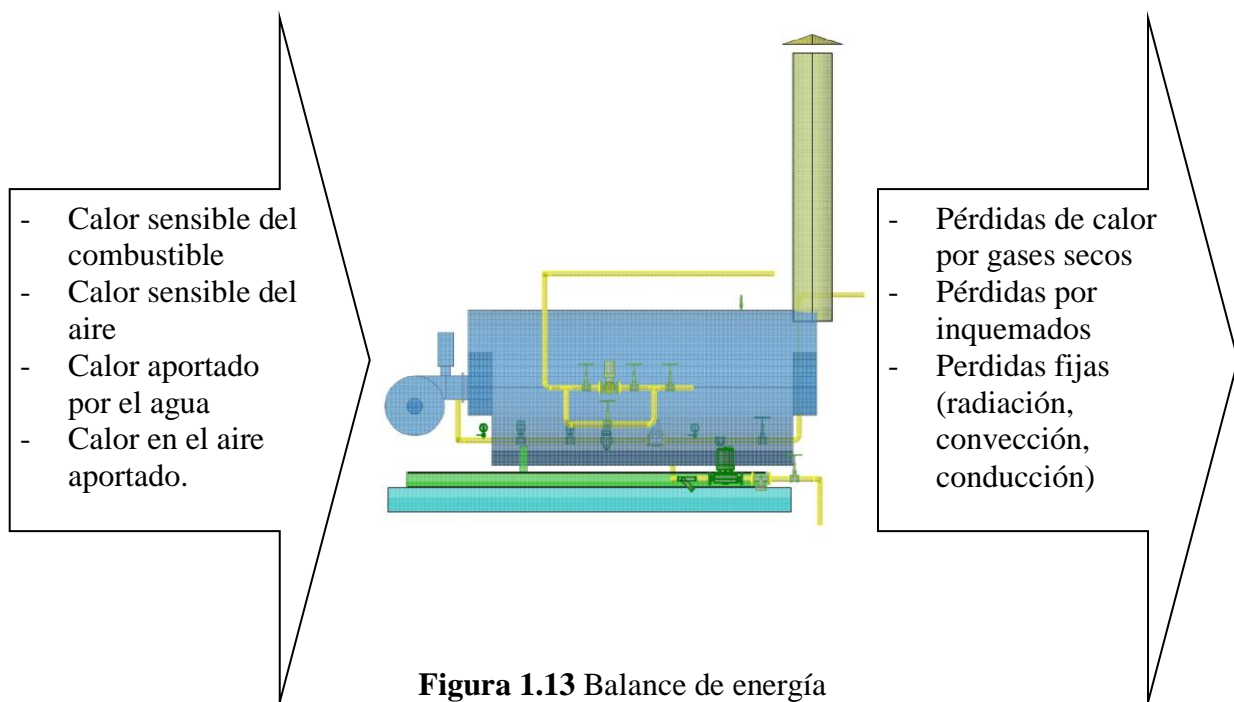


Figura 1.13 Balance de energía

1.5 Fundamento legal

El diseño y construcción de las calderas son de acuerdo a normas internacionales, es por eso que la caldera YB701C tiene estampe ASME, el código de referencia es la norma ASME VIII– Código de calderas y recipientes a presión (Boiler and Pressure Vessel Code).

La norma estándar ASME: PTC4.1-Unidades de generación de vapor (Steam Generating Units), que consiste en la determinación de la eficiencia de la caldera mediante los métodos: directo (método de las entradas y salidas) e indirecto (método de las pérdidas de calor).

Con respecto a las tuberías que intervienen en el transporte de vapor, las líneas de ingreso de agua, diesel y gas, es de acuerdo al código ASME B31.1, la cual establece normas y estándares para el diseño de las mismas, además de la fabricación, montaje e inspección.

En las mediciones de emisiones a la atmosfera, los equipos de la Refinería Shushufindi – EP PETROECUADOR, debe cumplir con los requerimientos dispuestos en el Libro VI, Anexo 3, del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente (TULSMA, el Acuerdo Ministerial 091, publicado en Registro Oficial No. 430, el 4 de enero del 2007).

La norma de calidad ISO 50001, tiene como finalidad el de orientar a las organizaciones, independientemente de su actividad; es una herramienta que permite la reducción de los consumos de energía, los costos financieros asociados y consecuentemente las emisiones de gases de efecto invernadero al ambiente.

La Norma Técnica Ecuatoriana INEN 2489:2009, indica el tipo de gas natural que se empleará en el ámbito industrial.

1.6 Operacionalización de las variables

En el siguiente esquema se indica las variables independientes y las variables dependientes (Tabla 1.12)

Tabla 1.12 Operacionalización de las variables

VARIABLE INDEPENDIENTE: Parámetros operacionales de la caldera YB701C

Concepto	Categoría	Indicadores	Ítem	Técnicas	Instrumentos
En una caldera el control de los parámetros operacionales ayudan a mejorar el aporte calor a través de la combustión, reducir los costos de producción y a mejorar las condiciones de los gases de combustión al ambientales	Portadores energéticos	Consumo promedio de gas natural	m ³ /h	Medición	Flujómetro
		Consumo promedio de agua	m ³ /h	Medición	Medidor de nivel

VARIABLE DEPENDIENTE: Eficiencia energética de la caldera.

Concepto	Categoría	Indicadores	Ítem	Técnicas	Instrumento
La Eficiencia energética consiste en optimizar el consumo de energía, costos de operación y promover sostenibilidad ambiental.	Eficiencia del generador de vapor.	Consumo de energía.	kW·h	Medición	Multímetro Pinza amperimétrica
		Pérdidas de calor	kJ/kg	Cálculos	Ecuaciones
		Contaminación ambiental	ppm	Medición	Analizador de gases

1.7 Conclusión del capítulo

Con la base teórica consultada, marcan las primeras pautas para el desarrollo e investigación sobre calderas y sus elementos que la componen, donde así mismo el equipo debe cumplir con normativas operacionales y ambientales.

CAPÍTULO 2

METODOLOGÍA PARA EL CÁLCULO DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE LA CALDERA PIROTUBULAR YB701C

2.1 Toma de mediciones

Para la determinación de la eficiencia energética de la caldera, se efectuó primeramente la toma de medidas y registro, mediante la utilización de equipos electrónicos y la verificación de los instrumentos.

A continuación se expone las mediciones a realizarse:

2.1.1 Medición de las condiciones del medio ambiente

Lo cual se realizó en el área de calderas de generación de vapor, con el equipo Elcometer 319/2, estación meteorológica y GPS, los datos que se consiguieron son:

- ✓ Humedad relativa (HR): Que es la cantidad de vapor de agua presente en el aire, medida en porcentaje (%).
- ✓ Temperatura de aire (T_a): Que es la temperatura que se encuentra en el ambiente, medida en grados Celsius ($^{\circ}$ C).
- ✓ Temperatura de Bulbo Seco (T_{bs}): La cual es igual a la temperatura ambiente (T_a), medida en grados Celsius ($^{\circ}$ C).
- ✓ Temperatura de bulbo húmedo (T_{bh}): Se obtiene de la temperatura del aire y la humedad relativa, medida en grados Celsius ($^{\circ}$ C).
- ✓ Presión barométrica (P_b): Se determina por medio de tablas, conociendo la elevación del lugar, para lo cual se utilizaría el GPS para obtener la altura.

2.1.2 Medición de gases producto de la combustión y temperatura de chimenea

Para la obtención de los valores se utilizó el equipo analizador de gases marca Testo modelo 330, el cual se le colocó en la toma muestras de la chimenea, en el que se tuvo información tales como:

- ✓ Concentraciones en partes por millón (ppm) y porcentajes (%), de los gases que resultan de la combustión, estos son: O_2 , CO_2 , CO , NO_x y SO_2 .
- ✓ La temperatura de los gases de combustión.

La recopilación de información se lo efectuó de forma mensual y de cinco meses.

2.1.3 Medición del oxígeno y exceso de aire en la combustión

Así mismo, para la evaluación se ejecutó con el analizador de gases de marca Testo modelo 330, el cual proporciona información relevante como porcentajes de oxígeno y el exceso de aire presentes en la combustión; además con el empleo del sicrómetro para determinación de la temperatura del aire que ingresa al quemador.

2.1.4 Evaluación del combustible

El análisis del combustible efectuado por el área de laboratorio (cromatografía), se empleó para obtener información relevante de las características del combustible (gas natural) utilizado para la combustión en el quemador de la caldera, como por ejemplo la composición química del gas, el poder calórico, la densidad, entre otros.

2.1.5 Evaluación del agua de alimentación

Para esta apreciación, se realizó la verificación y registro de los valores del controlador de conductividad instalado en la caldera y de los dispositivos instalados en las tuberías (termómetros, manómetros y placas orificio), además de los análisis del agua tratada proporcionada por el área de laboratorio, que serán de beneficio para el estudio.

2.1.6 Medición del vapor

Su medición se realizó por medio del medidor de flujo (placa orificio), instalado en la tubería de salida del generador de vapor, donde la señal es enviada a un monitor del panel de operación.

2.1.7 Evaluación de la presión y temperatura del vapor

De igual manera colocada a la salida de la línea de vapor, se encuentra un manómetro y un termómetro bimetálico, con lo que se registró la presión y temperatura respectivamente.

2.2 Procedimiento para el cálculo de la eficiencia energética para generadores de vapor

Para calcular la eficiencia energética de la caldera, se empleó como referencia a la norma ASME PTC 4.1. Existen dos métodos (ASME PTC 4.1, 1999; Ganapathy, 2015) estos procedimientos son:

1. Método directo
2. Método indirecto

2.2.1 Método directo

Conocido como método de entrada-salida, que es la relación entre el calor de salida ó aprovechado (Q_S) que es en forma de vapor y el calor de entrada (Q_E) el cual es la combustión. La ecuación es la siguiente:

$$\eta_{cal.} = \frac{Q_S}{Q_E} \cdot 100 \quad (\text{Ecuación 2.1})$$

$$Q_S = C_V \cdot (h_v - h_a) \quad (\text{Ecuación 2.2})$$

$$Q_E = (C_C \cdot PCN) \quad (\text{Ecuación 2.3})$$

Al remplazar la ecuación 2.2 y 2.3 en la 2.1, se consiguió la siguiente ecuación:

$$\eta_{cal.} = \frac{C_V \cdot (h_v - h_a)}{(C_C \cdot PCN)} \cdot 100 \quad (\text{Ecuación 2.4})$$

Siendo:

$\eta_{cal.}$: Rendimiento de la caldera (%)

C_V : Flujo másico de vapor generado por hora (kg/h)

C_C : Cantidad de combustible utilizado por hora (kg/h)

PCN : Poder calorífico neto del combustible (kJ/kg)

h_v : Entalpia del vapor (kJ/kg)

h_a : Entalpia del agua de alimentación (kJ/kg)

2.2.2 Método indirecto

El rendimiento se determina con la ecuación 2.5, en el que intervienen las pérdidas de calor, adiciones de calor y el poder calorífico neto. Las desventajas del método directo se pueden corregir con este método.

$$\eta_{cal.} = 100 - \frac{\sum \text{Pérdidas } (L_T)}{PCN + B_E} \cdot 100\% \quad (\text{Ecuación 2.5})$$

Siendo:

$\eta_{cal.}$: Rendimiento de la caldera (%)

L_T : Pérdidas totales (kJ/kg)

PCN : Poder calorífico neto del combustible (kJ/kg)

B_E : Calculo de las adiciones de calor (kJ/kg)

A. Cálculos preliminares

Las ecuaciones para los cálculos preliminares realizados son los que se detallan a continuación:

1. Consumo de Nitrógeno

$$F_{N_2} = \left\{ \frac{\left[\frac{(28,02 \cdot N_2)}{(12,01 \cdot (CO_2 + CO))} \right] \cdot \left[C + \frac{12,01 \cdot S}{32,07} \right]}{100} \right\} \quad (\text{Ecuación 2.6})$$

Siendo:

F_{N_2} : Consumo de nitrógeno (kg de N_2 / kg de combustible quemado)

N_2 : Nitrógeno en los gases de escape (%)

CO_2 : Dióxido de carbono en los gases de escape (%)

CO : Monóxido de carbono en los gases de escape (%)

C Carbono en el combustible (%)

S : Azufre en el combustible (%)

2. Consumo de Aire Seco

$$F_{as} = \frac{\left(\frac{F_{N_2} - N_2}{100} \right)}{0,7685} \quad (\text{Ecuación 2.7})$$

Siendo:

F_{as} : Consumo de aire seco [kg de aire seco / kg de combustible quemado (cq.)]

3. Aire teórico requerido para la combustión.

La relación teórica (estequiométrica) de aire, combustible y exceso de aire suministrado, se determina mediante la siguiente fórmula:

$$Air_t = \frac{\{(11,6 \cdot C) + [34,8 \cdot (H_2 - O_2/8)] + (4,35 \cdot S)\}}{100} \quad (\text{Ecuación 2.8})$$

Siendo:

Air_t : Aire teórico requerido para la combustión

C, H_2, O_2 y S : Carbón, hidrógeno, oxígeno y azufre presente en el combustible (%)

4. Determinación del exceso de aire

Para establecer el exceso de aire, se obtuvo mediante la siguiente ecuación:

$$Ex_{air} = k \cdot \frac{O_2}{21 - O_2} \cdot 100 \quad (\text{Ecuación 2.9})$$

Siendo:

Ex_{air} : Exceso de aire (%)

O_2 : Oxígeno en porcentaje (%)

k : Coeficiente para gas natural (0,9)

5. Masa real de aire suministrado

La masa actual de aire suministrado, se lo determinó mediante la siguiente ecuación:

$$m_{ra} = \left(1 + \frac{Ex_{air}}{100}\right) \cdot Air_t \quad (\text{Ecuación 2.10})$$

Dónde:

m_{ra} : Masa real de aire suministrado

6. Masa de los gases producto de la combustión

Es el peso del gas de combustión seca por kilogramo de combustible, la ecuación para determinar es la siguiente:

$$m_{gc} = \frac{44 \cdot CO_2 + 28 \cdot (CO + N_2) + 32 \cdot O_2}{12 \cdot (CO_2 + CO)} \cdot \left(C + \frac{12 \cdot S}{32}\right) \quad (\text{Ecuación 2.11})$$

Siendo:

m_{gc} : Masa de los gases producto de la combustión (kg / kg de cq.)

N_2 : Nitrógeno en los gases de escape (%)

CO_2 : Dióxido de carbono en los gases de escape (%)

CO : Monóxido de carbono en los gases de escape (%)

C : Carbono en el combustible (%)

S : Azufre en el combustible (%)

B. Cálculo de las adiciones de calor (B_E)

Las adiciones de calor se define como las cantidades de calor añadido a la envolvente del generador de vapor y que no sea el calor químico del combustible.

Las ecuaciones con que se realizaron los cálculos son los siguientes:

1. Calor sensible en el aire de entrada

$$C_1 = F_{as} \cdot Cp_{as} \cdot (T_{aq} - T_a) \quad (\text{Ecuación 2.12})$$

Siendo:

C_1 : Calor del aire de entrada (kJ/kg)

Cp_{as} : Calor específico del aire seco (kJ/kg °C)

T_{aq} : Temperatura del aire al quemador (°C)

T_a : Temperatura del aire al ambiente (°C)

2. Calor sensible en el combustible

$$C_2 = Cp_c \cdot (T_c - T_a) \quad (\text{Ecuación 2.13})$$

Siendo:

C_2 : Calor sensible del combustible (kJ/kg)

Cp_c : Calor específico del combustible (kJ/kg °C)

T_c : Temperatura del combustible (°C)

3. Calor sensible del agua tratada a calentar

$$C_3 = C_{p_a} \cdot T_{ac} \quad (\text{Ecuación 2.14})$$

Siendo:

C_3 : Calor sensible del agua tratada (kJ/kg)

C_{p_a} : Calor específico del agua (kJ/kg °C)

T_{ac} : Temperatura del agua que ingresa a la caldera (°C)

4. Calor que entra con la humedad del aire

$$C_4 = F_{as} \cdot H_a \cdot C_{p_v} \cdot (T_{aq} - T_a) \quad (\text{Ecuación 2.15})$$

Siendo:

C_4 : Calor que entra en la humedad del aire (kJ/kg)

H_a : Humedad en el aire, kg agua por cada kg aire seco

C_{p_v} : Calor específico del vapor (kJ/kg °C)

C. Cálculo de pérdidas de energía (L_T)

Las pérdidas totales es la sumatoria de todas las pérdidas

$$L_T = q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6 + q_7 + q_8 \quad (\text{Ecuación 2.16})$$

Para esta valoración de las pérdidas totales se ejecutó los siguientes cálculos preliminares:

1. Pérdida de calor por gases secos de la combustión

$$q_1 = m_{gc} \cdot C_{p_{gc}} \cdot (T_{gc} - T_a) \quad (\text{Ecuación 2.17})$$

Siendo:

q_1 : Pérdida de calor por los gases de combustión seca (kJ/kg)

C_{p_h} : Calor específico de los gases producto de la combustión (kJ/kg·°C)

T_{gc} : Temperatura de los gases producto de la combustión (°C)

T_a : Temperatura del aire al ambiente (°C)

2. Pérdida de calor debido al hidrógeno(H_2) en el combustible

$$q_2 = 9 \cdot H_2 \cdot [h_{va} + C_{vsc} \cdot (T_{gc} - T_a)] \quad (\text{Ecuación 2.18})$$

Siendo:

q_2 : Pérdida de calor debido al hidrógeno en el combustible (kJ/kg)

H_2 : Kilogramo de hidrógeno presente en el combustible (kg)

$C_{p_{vsc}}$: Calor específico del vapor sobrecalentado (kJ/kg·°C)

h_{va} : Calor latente a la presión parcial de vapor de agua (kJ/kg)

3. Pérdida de calor debido a la humedad presente en el combustible.

$$q_3 = m_{hd} \cdot [h_{va} + C_{p_{vsc}} \cdot (T_{gc} - T_a)] \quad (\text{Ecuación 2.19})$$

Siendo:

q_3 : Pérdida de calor debido a la humedad presente en el combustible (kJ/kg)

m_{hd} : cantidad de humedad presente en el combustible quemado (kg/kg cq.)

$C_{p_{vsc}}$: Calor específico del vapor sobrecalentado (kJ/kg $^{\circ}$ C)

h_{va} : Calor latente a la presión parcial de vapor de agua (kJ/kg)

4. Pérdida de calor debido a la humedad presente en el aire

$$q_4 = m_{ra} \cdot X_h \cdot C_{vsc} \cdot (T_{gc} - T_a) \quad (\text{Ecuación 2.20})$$

Siendo:

q_4 : Pérdida de calor debido a la humedad presente en el aire (kJ/kg)

m_{ra} : Masa real de aire suministrado por kg de combustible

X_h : Factor de humedad en kg de agua/kg de aire seco

$C_{p_{vsc}}$: Calor específico del vapor sobrecalentado (kJ/kg $^{\circ}$ C)

5. Pérdida de calor debido a la formación de monóxido de carbono (CO)

$$q_5 = \frac{24048 \cdot CO \cdot C}{(CO + CO_2)} \quad (\text{Ecuación 2.21})$$

Siendo:

q_5 : Pérdida de calor debido a la combustión incompleta (%)

CO: Volumen de monóxido de carbono en los gases de combustión (%)

CO₂: Volumen de dióxido de carbono en los gases de combustión (%)

C: Carbono en el combustible (%)

6. Pérdidas de calor por radiación y convección

Las pérdidas por radiación, convección y otras pérdidas no contabilizadas, se asume en función del tipo y tamaño de la caldera que se indica a continuación:

✓ Para calderas pirotubulares : 1,5 a 2,5 %

Pero existen las ecuaciones para calcular (Cengel, 2007), que se muestra a continuación:

Pérdida de calor por radiación:

$$q_{rad} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A_s \cdot (T_s^4 - T_a^4) \quad (\text{Ecuación 2.22})$$

Siendo:

q_{rad} : Pérdida por radiación (W)

ε : Emisividad del cuerpo (a dimensional)

σ : Constante de Stefan Boltzmann : $5,6704 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$

A_s : Área del cuerpo (m^2)

T_s : Temperatura de superficial del cuerpo (K)

T_a : Temperatura ambiente (K)

Pérdida de calor por convección:

Las propiedades del aire a la temperatura de película de T_f son:

$$T_f = \frac{T_s + T_a}{2} \quad (\text{Ecuación 2.23})$$

$$\beta = \frac{1}{T_f} \quad (\text{Ecuación 2.24})$$

El número de Reynolds (Re) queda:

$$Re = \frac{V_v \cdot L_c^3}{\nu^2} \quad (\text{Ecuación 2.25})$$

En este caso se determinó el número de Nusselt (Nu) para la convección a partir de las siguientes ecuaciones:

Para el caso de cuerpos cilíndricos:

$$Nu = 0,3 + \frac{0,62 \cdot Re^{1/2} \cdot Pr^{1/3}}{\left[1 + \left(\frac{0,4}{Pr}\right)^{2/3}\right]^{1/4}} \left[1 + \left(\frac{Re}{282000}\right)^{5/8}\right]^{4/5} \quad (\text{Ecuación 2.26})$$

El número de Prandtl (Pr) se seleccionó de tablas [Anexo 9]

Para el caso de cuerpos planos:

$$Nu = 0,664 \cdot Re^{0,5} \cdot Pr^{1/3} \quad (\text{Ecuación 2.27})$$

Donde el coeficiente de convección es:

$$h = \frac{k}{L_c} \cdot Nu \quad (\text{Ecuación 2.28})$$

Donde la pérdida por convección es:

$$q_{conv} = h \cdot A_s \cdot (T_s - T_a) \quad (\text{Ecuación 2.29})$$

Siendo:

q_{conv} : Pérdida por convección (W)

k: coeficiente de conductividad térmica (W/m.°C)

V_v : Velocidad del viento (m/s)

ν : viscosidad cinemática (m^2/s)

Re: Número de Reynolds (adimensional)

Nu: Número de Nusselt (adimensional)

Pr: Número de Prandtl

β : Coeficiente de expansividad volumétrica (1/K)

La pérdida total de radiación y convección estará dada por la siguiente ecuación:

$$q_6 = q_{rad} + q_{conv} \quad (\text{Ecuación 2.30})$$

Siendo:

q_6 : Pérdidas de radiación y convección (kJ/kg)

q_{rad} : Pérdida por radiación (kJ/kg)

q_{conv} : Pérdida por convección (kJ/kg)

Para obtener la pérdida de calor q_6 en kJ/kg, se la divide para el consumo de combustible.

6 Pérdida de calor debido a las cenizas no quemadas

$$q_7 = m_{cc} \cdot PC_C \quad (\text{Ecuación 2.31})$$

Siendo:

q_7 : Pérdida de calor debido a las cenizas no quemadas (kJ/kg)

m_{cc} : Cantidad de cenizas (kg) por kilogramo de combustible quemado

PC_C : Poder calorífico de las cenizas (kJ/kg)

7 Pérdida de calor debido a las cenizas en el fondo

$$q_8 = m_{cc} \cdot PC_{CF} \quad (\text{Ecuación 2.32})$$

Siendo:

q_8 : Pérdida de calor debido a las cenizas en el fondo (kJ/kg)

m_{cc} : Cantidad de cenizas (kg) por kilogramo de combustible quemado

PC_{CF} : Poder calorífico de las cenizas del fondo (kJ/kg)

2.4. Cálculo del consumo de energía eléctrica de los equipos

Para el cálculo del consumo de energía eléctrica que intervienen en el sistema de generación de vapor, es necesario obtener datos de voltaje y amperaje, los cuales se consiguen en campo con el multímetro y la pinza amperimétrica.

Entre los equipos que intervienen en el proceso:

2.4.1 Bomba de alimentación de agua tratada al deareador

$$P = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \cos\phi \quad (\text{Ecuación 2.33})$$

$$E_{bd} = P \cdot t \quad (\text{Ecuación 2.34})$$

Siendo:

P : Potencia motor (kW)

V : Voltaje del motor (V)

I : Intensidad del motor (Amp)

t : Tiempo de operación (h)

E_{bd} : Energía consumida por descarga de bomba al deareador (kWh)

2.4.2 Bomba de alimentación de agua a caldera

$$E_{bc} = P \cdot t \quad (\text{Ecuación 2.35})$$

Siendo:

E_{bc} : Energía consumida por descarga de bomba en caldera (kWh)

2.4.3 Soplador de aire del quemador

$$E_s = P \cdot t \quad (\text{Ecuación 2.36})$$

Siendo:

E_s : Energía consumida por soplador de la caldera (kWh)

2.4.4 Bomba de quimicos – Secuestrante

$$E_{bs} = P \cdot t \quad (\text{Ecuación 2.37})$$

Siendo:

E_{bs} : Energía consumida por bomba de secustrante (kWh)

2.4.5 Bomba de quimicos –Acondicionador

$$E_{ba} = P \cdot t \quad (\text{Ecuación 2.38})$$

Siendo:

E_{ba} : Energía consumida por bomba de acondicionador (kWh)

2.5 Simulación con el uso del método de elementos finitos.

Mediante el empleo del software profesional ANSYS WORKBENCH, se procura simular las condiciones térmicas del sistema de la caldera, el cual usa el método de elementos finitos.

El método de elementos finitos (MEF), es muy utilizado para la determinación de ecuaciones diferenciales. El primer paso en el procedimiento de solución de elementos finitos es dividir el dominio en elementos, a este proceso se denomina discretización. La distribución de los elementos forma una malla. Los elementos están conectados en puntos llamados nodos. La región a estudio se discretiza, las ecuaciones que rigen para cada elemento deben establecerse para la física requerida. En este programa se establece

propiedades de los materiales, tales como la conductividad térmica para el análisis térmico.

2.6 Procedimiento para la evaluación económica e impacto ambiental del proceso estudiado

Al hablar de la metodología posiblemente lo primero que se supone es ver el desarrollo de fórmulas que nos indicaran el beneficio del estudio, sin embargo, no es siempre así y en especial para estudios de factibilidad, donde se deben realizar varias consideraciones tanto de carácter técnico, ambiental como económico (Fiscal, 2007).

Las consideraciones a ser tomadas en cuenta son:

- ✓ Costos de mano de obra, materiales y equipos utilizados.
- ✓ Precio del gas combustible.
- ✓ Valor del impacto ambiental.

Los valores conseguidos respecto a lo indicado se detallan en el Capítulo 4.

2.7 Técnica del Chi-cuadrado para evaluación de hipótesis.

Para la comprobación de hipótesis, se aplica la técnica más empleada que es la denominada prueba chi-cuadrado (χ^2) de independencia (Hernández, 2006; Walpole *et al.*, 2012).

El planteamiento de la hipótesis nula que se va a verificar con la prueba de chi-cuadrado de independencia es:

Hipótesis nula (H_0): Los dos criterios de clasificación son independientes

Hipótesis alternativa (H_1): Los dos criterios de clasificación no son independientes

Las frecuencias esperadas y observadas que se determinaran, serán en base a las siguientes expresiones:

$$fe = n \cdot \wp \quad \text{(Ecuación 2.39)}$$

Siendo:

fe : frecuencia esperada

n : Número total de observaciones

\wp : Probabilidad de ocurrencia de cada evento

fo : frecuencia observada

La expresión de la prueba de chi-cuadrado:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^c \left[\frac{(fo_{ij} - fe_{ij})^2}{fe_{ij}} \right] \quad \text{(Ecuación 2.40)}$$

Los grados de libertad se determinaron mediante la siguiente expresión:

$$Gl = (r - 1) \cdot (c - 1) \quad (\text{Ecuación 2.41})$$

Siendo

Gl : Grados de libertad

r : número de filas

c : número de columnas

Cuando chi-cuadrado calculado (X^2) es mayor que el chi-cuadrado de la tabla (X_α^2), se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa.

$$X^2 > X_\alpha^2 \quad (\text{Ecuación 2.42})$$

2.8 Métodos, técnicas e instrumentos empleados en la investigación

2.8.1 Modalidades de la Investigación

Las principales modalidades de investigación, se exponen a continuación:

Campo, se obtuvo la información de forma directa, con lo que se consiguió determinar el estado previo del equipo.

Bibliográfica, se discernió la información más relevante que se empleó para comparar con las condiciones de operación de la caldera.

Especiales, como son la utilización de programas y de tecnología (equipos), para la evaluación de resultados y la posteriores propuestas para el incremento de la eficiencia del equipo.

2.8.2 Tipos de Investigaciones

Los tipos de investigación que se utilizó fueron las siguientes:

Exploratoria, con el fin de conocer las condiciones de funcionamiento de la caldera y sus componentes.

Descriptiva, se analizó el comportamiento de la caldera y la combustión a diferentes cargas, con el hecho de realizar la variación en la relación de flujos de entrada de aire y gas combustible al quemador, en donde así mismo se valoró las características de las emisiones a la atmósfera.

Experimental, la obtención de la caracterización de un buen rendimiento de la combustión, se efectuó experimentalmente variando los parámetros operacionales de aire combustible y verificando con el analizador de gases Testo.

Explicativa, porque en base a las curvas de operación de la caldera, se cuantifico los valores ideales para el funcionamiento e incremento de la eficiencia del equipo.

Computacional, para la validación de los cálculos del proceso, se realizó la simulación en el que se aprecia mediante gráficos el comportamiento de la combustión.

2.8.3 Técnicas e instrumentos

Se detalla a continuación las técnicas e instrumentos empleados:

Tabla 2.1 Técnicas e Instrumentos

TÉCNICAS	INSTRUMENTOS
Medición	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Analizador de gases ✓ Cámara termográfica. ✓ Pinza amperimétrica. ✓ Multímetro. ✓ Sicrometro. ✓ Cromatógrafo. ✓ Analizador de agua.
Cálculo	Ecuaciones de termodinámica.
Software (simulación térmica)	Base de datos (Combustión)

2.8.3.1 Equipos:

- a) **Analizador de gases.**- Para la medición se gases de combustión que salen por la chimenea de la caldera, se utilizó un equipo portátil que es un “Analizador de gases” de marca Testo, modelo 330. (Figura2.1).



Figura 2.1 Analizador de gases

Propiedad: Refinería Shushufindi

- b) **Cámara termográfica.-** Para el análisis de las temperaturas de la caldera, se empleó una cámara termográfica, marca: Flir, modelo: T360, posee software para evaluación. El rango de medición entre 0 a 1200°C.



Figura 2.2 Cámara termográfica

Propiedad: Refinería Shushufindi

- c) **Pinza amperimétrica.-** Equipo que se utilizó para la medición de corriente en amperios. De marca Fluke, modelo 322, que soporta un rango de CA hasta 400 A.



Figura 2.3 Pinza amperimétrica

Propiedad: Refinería Shushufindi

- d) **Multímetro.-** Este instrumento fue indispensable para medir el voltaje y así obtener el consumo real que se tiene en los motores de las bombas. La marca Fluke, modelo 117 y soporta hasta una tensión máxima de 600V.



Figura 2.4 Multímetro

Propiedad: Refinería Shushufindi

- e) **Sicrómetro.-** Este instrumento es importante en la medición de parámetros ambientales, de marca Elcometer, modelo: 319/2.



Figura 2.14 Sicrómetro

Propiedad: Refinería Shushufindi

- f) **Cromatógrafo.-** Equipo importante que se utilizó para realizar la cromatografía del gas combustible, de marca Perkin Elmer



Figura 2.6 Cromatógrafo

Propiedad: Refinería Shushufindi

- g) **Analizador de agua.-** Este dispositivo muy importante para determinación de características del agua (pH, conductividad, sólidos disueltos, otros), de marca Orion Versa Star.



Figura 2.7 Analizador de agua

Propiedad: Refinería Shushufindi

2.8.3.2 Software

ANSYS 17.0.- Es un software ingenieril, el cual se empleó para simulación de los fluidos (gas combustible y aire) que intervienen para generar la combustión, los que reaccionan en el interior de la cámara del hogar de la caldera; esto desarrollado bajo la función de la teoría de elementos finitos.

2.9 Población y Muestra

La caldera se encuentra ubicada en el área de generación de vapor de la Refinería Shushufindi-EP PETROECUADOR, ubicada en el Cantón Shushufindi.

La generación de vapor máxima de la caldera YB701C debe ser de 3136,36 kg/h (6900 lb/h) de vapor saturado, a una presión promedio de 120 psi.

El personal responsable de la operación de la caldera, depende de cuatro grupos para cubrir las 24 horas y durante los 365 días del año, se describe en la Tabla 2.2 el personal que cubre un grupo.

Tabla 2.2 Personal responsable de la operación de la caldera

DEPARTAMENTO	POBLACIÓN
Coordinador de Operación	1
Personal de operación:	4
Total:	5

2.10 Conclusiones del capítulo

- ✓ Se revisó los pasos para calcular las pérdidas de energía en la caldera y su eficiencia mediante los métodos directos e indirectos.
- ✓ En este capítulo se definió los métodos, técnicas e instrumentos para la obtención de valores que fueron analizados en el desarrollo de la investigación.

CAPÍTULO 3

ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

3.1 Mediciones

3.1.1 Valores permisibles de las emisiones a la atmósfera de la caldera YB701C

Los valores máximos permisibles para la emisión de gases, están en base a la normativa vigente del Ecuador (Acuerdo Ministerial 091). Los valores obtenidos se detallan en la tabla siguiente (Tabla 3.1).

Tabla 3.1 Valores permisibles de los gases producto de la combustión

Parámetro	UDM	Tipo Combustible	
		GLP	Diésel
Material particulado (MP)	mg/m ³	N.A.	150
Óxidos de azufre (SO ₂)	mg/m ³	30	1650
Óxidos de nitrógeno (NOx)	mg/m ³	400	550
Óxidos de carbono (CO)	mg/m ³	N.A.	50
Compuestos orgánicos volátiles (COV)	mg/m ³	5	10
Hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs)	mg/m ³	0,1	0,1

Fuente: Acuerdo Ministerial 091

De acuerdo al Decreto Ejecutivo 1215, las condiciones para el muestreo y monitoreo son:

- ✓ Semanalmente en refinerías.
- ✓ Mínimo trimestralmente en calderas, mecheros, generadores y otras fuentes de emisión.
- ✓ Los muestreos se efectuarán en el punto de emisión (en este caso puertos de muestreo de chimeneas).
- ✓ Se realizarán por lo menos dos lecturas, con un intervalo de dos horas para la determinación de cada parámetro.

Las mediciones de las emisiones a la atmósfera de la caldera, fueron tomadas en la toma muestras de la chimenea, esto se consiguió con el equipo analizador portátil de gases de marca Testo. El combustible con el que está operando la caldera el mayor tiempo es gas natural. Los valores corresponden a los meses de junio hasta octubre del 2015, los cuales se detallan en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2 Mediciones de los gases producto de la combustión de la caldera

Parámetro	UDM	Jun. 2015 Gas	Jul. 2015 Gas	Ago. 2015 Gas	Sep. 2015 Gas	Oct. 2015 Gas	Promedio
Material particulado (MP)	mg/Nm ³	NM	NM	NM	NM	NM	NA
Óxidos de azufre (SO ₂)	mg/Nm ³	0	0	0	0	0	0
Óxidos de nitrógeno (NO _x)	mg/Nm ³	47	28	31	29	45	36
Óxidos de carbono (CO)	mg/Nm ³	1829	2248	1038	788	98	1200
Compuestos orgánicos volátiles (COV)	mg/Nm ³	NM	NM	NM	NM	NM	NA
Hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs)	mg/Nm ³	NM	NM	NM	NM	NM	NA

Nomenclatura: Gas: Gas natural utilizado en la combustión
 NM: No Medido
 NA: No Aplica

Para la operación de la caldera se emplea gas natural, el diésel se utiliza en casos de emergencia y son periodos de días u horas, por lo que se omite el estudio con el diésel para el análisis energético.

La medición del material particulado (MP) no se realizó ya que de acuerdo a la normativa ambiental, para el caso de gas natural no aplica; para los compuestos orgánicos volátiles (COV) Hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs) no son tan importantes para la determinación de la eficiencia de la caldera, además de que no se posee los equipos para medir.

Al comparar los datos obtenidos (Tabla 3.2) con los datos de la normativa (Tabla 3.1), se deduce que los gases producto de la combustión, se encuentran dentro de los parámetros de la normativa vigente ecuatoriana, por lo que se está cumpliendo con este requisito. Sin embargo, los valores son altos para lograr conseguir un buen rendimiento de combustión.

3.1.2 Valores de las condiciones de operación

Los datos que se puntualizan posteriormente, son valores obtenidos mediante los equipos e instrumentos de medición, se puede apreciar las condiciones a la que opera la caldera, en la Tabla 3.3 muestran los detalles:

Tabla 3.3 Datos de operación de la caldera

Datos de caldera en operación	Valor
Presión de vapor generado (kPa)	896
Cantidad de vapor generado (kg/h)	2520
Temperatura del combustible (°C)	80
Temperatura del agua de ingreso (°C)	70
Temperatura del aire de ingreso (°C)	25
Temperatura de gases producto combustión T_h (°C)	209,9
Consumo de gas combustible Q_c (kg/h)	168,2
Temperatura ambiente T_a (°C)	27

Las condiciones ambientales del área de calderas son las que se indican en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4 Condiciones ambientales

Parámetro	Valor
Temperatura de bulbo seco T_{bs} (°C)	27
Temperatura de bulbo húmedo T_{bh} (°C)	26
Temperatura ambiente T_a (°C)	27
Humedad relativa HR (%)	86
Presión barométrica P_b (kPa)	97,78
Velocidad del viento V_v (m/s)	1,54

La composición química del gas combustible tipo 1 y 2, utilizado para la combustión de la caldera, obtenida de las cromatografías, se muestra en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5 Composición del gas combustible

Compuesto	Gas combustible Tipo 1		Gas combustible Tipo 2	
	% Peso	% Molar	% Peso	% Molar
Nitrógeno N_2	7,70	5,56	11,54	9,50
Metano C_1	60,83	76,71	45,21	65,14
Etano C_2	15,37	10,34	11,05	8,49
Propano C_3	5,98	2,74	6,05	3,17
Iso Butano IC_4	0	0	0	0
Butano C_4	0	0	0	0
Iso Pentano IC_5	0	0	0	0
Pentano C_5	0	0	0	0
Hexano C_6	0	0	0	0
Dióxido Carbono CO_2	10,12	4,65	26,15	13,70
TOTAL:	100	100	100	100

Las cromatografías las efectuaron personal de Laboratorio. [Anexo 2]

✓ **Gas combustible Tipo 1.-** Cromatografía y calibración en el mes de octubre 2015

✓ **Gas combustible Tipo 2.-** Cromatografía y calibración en el mes de abril 2016

El poder calorífico neto del gas combustible, se establece así mismo de la cromatografía:

Tabla 3.6 Poder calorífico neto de los combustibles

	Gas combustible Tipo 1	Gas combustible Tipo2
PCN del combustible (kJ/Kg)	49546,23	37536,91

3.2 Cálculo de la eficiencia de la caldera

La eficiencia de las calderas por lo general está alrededor del 82 % al emplear gas natural como combustible (Lipták *et al.*, 2006).

3.2.1 Rendimiento de la caldera por el Método Directo

Para la determinación del rendimiento de la caldera mediante el método directo, los valores del consumo de combustible (C_C) y el flujo másico de vapor generado (C_V) se consiguieron de los instrumentos (marca: Honeywell) que se encuentran instalados en las tuberías; el poder calorífico neto (PCN) se obtuvo de la cromatografías del gas (Anexo 2) y las entalpías del vapor (h_v) y del agua de ingreso (h_a) se establece en tablas (Anexo 3).

Por lo expuesto, el rendimiento de la caldera para el gas combustible Tipo 1 es:

$$\eta_{cal.} = 74,98 \% \quad (\text{Respuesta 3.1})$$

3.2.2 Rendimiento de la caldera por el Método Indirecto

Para la determinación del rendimiento del equipo se siguió el procedimiento mostrado en el Capítulo 2, los resultados son para el gas combustible tipo 1 fueron:

A. Valores de los cálculos preliminares

Tabla 3.7 Valores de los cálculos preliminares

Parámetro	Valor	Unidad
Consumo de Nitrógeno F_{N_2} (Ec. 2.6)	0,0016	kg/kg combustible quemado
Consumo de Aire Seco F_{as} (Ec. 2.7)	0,0021	kg/kg combustible quemado
Aire Teórico requerido para la combustión Air_t (Ec. 2.8)	17,84	%
Exceso de Aire (Ex_{air}) (Ec. 2.9)	147,20	%

Parámetro	Valor	Unidad
Masa real de aire suministrado (m_{ra}) (Ec. 2.10)	44,09	kg/kg combustible quemado
Masa de los humos (m_h) (Ec. 2.11)	22,58	kg/kg combustible quemado

B. Valores de las adiciones de calor (B_E)

Los valores de las adiciones de calor, conseguidos mediante las soluciones de las ecuaciones indicadas en el capítulo anterior (CAPÍTULO II), son las que se muestran a continuación:

Tabla 3.8 Valores de los adicionales de calor

Parámetro	Valor	Unidad
Calor sensible en el aire de entrada C_1 (Ec. 2.12)	0,0021	kJ/kg
Calor sensible en el combustible C_2 (Ec. 2.13)	112,40	kJ/kg
Calor de entrada del agua C_3 (Ec. 2.14)	140,00	kJ/kg
Calor que entra con la humedad del aire C_4 (Ec. 2.15)	0,001	kJ/kg
TOTAL:	252,40	kJ/kg

C. Valores de las pérdidas de energía en la caldera

Previo el cálculo de las pérdidas de energía en la caldera, se efectuó un monitoreo de las emisiones a la atmósfera con el analizador de gases de marca Testo, el cual se ubicó en la toma muestras de la chimenea; el registro de la información conseguida, corresponde a los meses de junio a octubre 2015, los resultados son los que se muestran a continuación:

Tabla 3.9 Emisiones de gases a la atmósfera

Fecha	Tgc °C	O ₂ %	CO ₂ %	CO ppm	NO _x ppm	SO ₂ ppm	Exc _{air} %	η_{Comb} %	Ta °C
20/06/2015	233,2	12,8	5,8	1822,0	21,0	0,0	140,5	76,8	30,8
23/06/2015	234,9	11,7	6,7	1104,0	25,0	0,0	113,2	78,3	27,6
04/07/2015	189,5	12,8	5,9	1800,0	17,0	0,0	140,9	80,0	27,9
17/07/2015	190,2	12,6	6,0	1797,0	10,0	0,0	135,3	81,5	33,7
15/08/2015	195,5	12,7	6,0	1031,0	16,0	0,0	138,3	80,7	27,0
25/08/2015	202,5	13,4	5,5	630,0	14,0	0,0	158,7	78,0	28,8
11/09/2015	215,0	12,5	5,8	970,0	27,0	0,0	132,4	80,2	28,7
12/10/2015	218,3	11,5	6,2	870,0	22,0	0,0	109,0	81,5	29,5
Promedio	209,9	12,5	6,0	1253,0	19,0	0,0	133,5	79,6	29,3

Tgc: Temperatura gases de combustión **η_{Comb} :** Rendimiento de la combustión

Ta: Temperatura del aire al ambiente

Distribución de la temperatura en la caldera

Para la determinación de las temperaturas exteriores de cada parte del cuerpo de la caldera, se efectuó la toma imágenes termográficas con la cámara termográfica de marca: Flir (Figura 3.1), el total de fotos fueron ocho.

A continuación se indica una foto termográfica realizada:



Figura 3.1 Imagen termográfica de la caldera YB701C

Las temperaturas del cuerpo de la caldera, varían conforme su ubicación, por lo tanto se realizó un esquema de distribución de temperaturas de cada parte del equipo, con el objeto de tener información más acertada.

A continuación se indica la distribución de las zonas para su respectivo análisis:

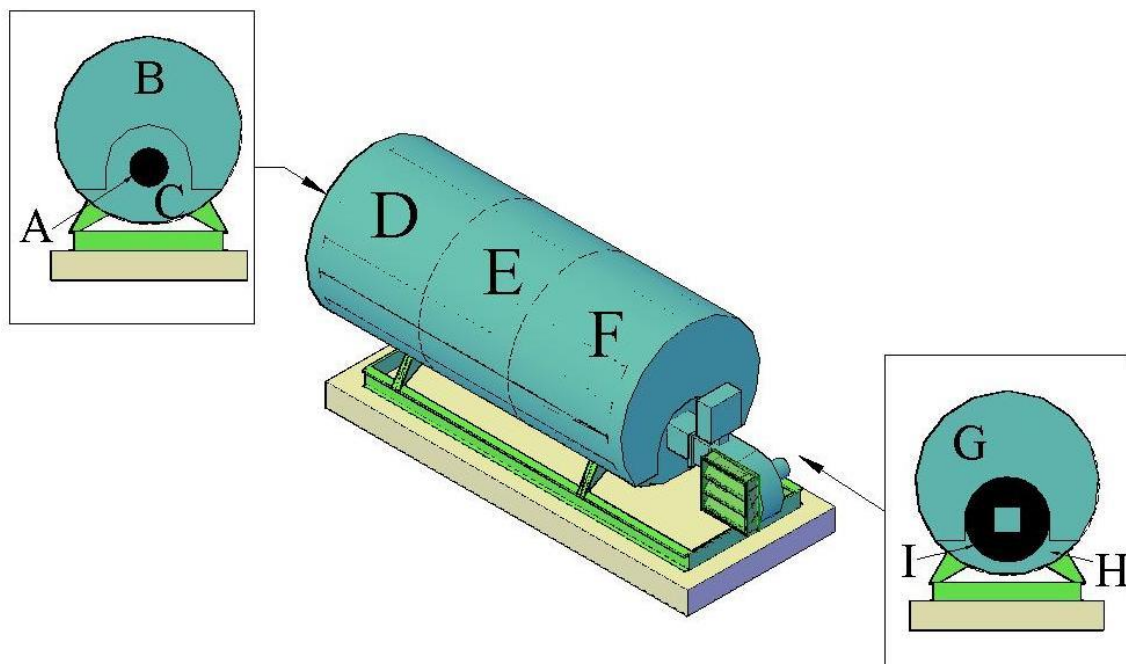


Figura 3.2 Zonas de análisis de temperatura de la caldera

Los resultados de la asignación de temperaturas promedio de cada zona, se exponen en la siguiente tabla:

Tabla 3.10 Temperatura de las superficies de la caldera

Zona	Ubicación	Área (m ²)	Emisividad ϵ	Temperatura Promedio (Tp) (° C)
A	Entrada hombre	0,13	0,98	147,63
B	Compuertas delanteras	2,55	0,85	58,60
C	Placa delantera	0,81	0,85	83,15
D	Cuerpo cilíndrico	10,99	0,85	47,10
E	Cuerpo cilíndrico	9,87	0,85	48,65
F	Cuerpo cilíndrico	10,99	0,85	47,83
G	Compuertas posteriores	2,55	0,85	65,84
H	Placa posterior	0,28	0,85	160,90
I	Tapa de sujeción quemador	0,66	0,98	196,22
TOTAL:		38,84		

Con la información conseguida en la Tabla 3.10, se procedió al cálculo de las pérdidas de radiación y convección de todo el cuerpo de la caldera pirotubular YB701C, los cuales son los que se muestran a continuación:

Tabla 3.11 Cuantificación de las pérdidas de radiación y convección

Zona	Ubicación	A _s (m ²)	grad (W)	qconv (W)	q ₆ (W)	Re	Nu	v (m ² /s)	Pr	h (W/m. °K)
A	Entrada hombre	0,13	162,13	11,12	173,24	3722,86	9,64	2,156E-05	0,7141	0,7104
B	Compuertas delanteras	2,55	491,44	64,12	555,56	89983,28	48,15	1,756E-05	0,7252	0,7943
C	Placa delantera	0,81	310,37	30,63	341,01	26964,94	26,24	1,832E-05	0,7219	0,6769
D	Cuerpo cilíndrico	10,99	1271,11	19789,57	21060,68	130263,03	7182,73	1,659E-05	0,7267	89,5568
E	Cuerpo cilíndrico	9,87	1238,58	19083,17	20321,74	129689,94	7147,13	1,667E-05	0,7265	89,3087
F	Cuerpo cilíndrico	10,99	1322,26	20484,55	21806,81	129990,55	7165,80	1,663E-05	0,7266	89,4388
G	Compuertas posteriores	2,55	625,74	79,53	705,27	90072,23	48,10	1,748E-05	0,7242	0,8015
H	Placa posterior	0,28	367,81	25,92	393,73	7768,83	13,90	2,226E-05	0,7127	0,6935
I	Tapa de sujeción quemador	0,66	1428,19	77,85	1506,04	16627,09	20,24	2,414E-05	0,7092	0,7006
TOTAL:					66864,08					

Las pérdidas totales por radiación y convección (q₆) fueron de 66864,08 W, al convertir las unidades en el Sistema Internacional (SI) dio como resultado 1430,83 kJ/kg.

Las pérdidas de calor que se generaron en la caldera pirotubular YB701C, en condiciones iniciales (antes de la calibración) son las que se detallan en la Tabla 3.12.

Tabla 3.12 Valores de las pérdidas de energía en la caldera

Parámetro	Valor	Unidad
Pérdida de calor por gases secos de la combustión q_1 (Ec. 2.17)	4335,44	kJ/kg
Pérdida de calor debido al hidrógeno en el combustible q_2 (Ec. 2.18)	427,50	kJ/kg
Pérdida de calor debido a la humedad presente en el combustible q_3 (Ec. 2.19)	930,29	kJ/kg
Pérdida de calor debido a la humedad presente en el aire q_4 (Ec. 2.20)	525,17	kJ/kg
Pérdida de calor debido a la formación de monóxido de carbono (CO) q_5 (Ec. 2.21)	1775,20	kJ/kg
Pérdidas de calor por radiación y convección q_6 (Ec. 2.30)	1430,83	kJ/kg
Pérdida de calor debido a las cenizas no quemadas q_7 (Ec. 2.31)	80,16	kJ/kg
Pérdida de calor debido a la cenizas en el fondo q_8 (Ec. 2.32)	260,15	kJ/kg
TOTAL:	9764,74	kJ/kg

Como se evidencia, las mayores pérdidas que afectan al rendimiento del equipo son:

- ✓ Pérdida de calor por gases secos de la combustión q_1
- ✓ Pérdida de calor debido a la formación de monóxido de carbono (CO) q_5

Por lo tanto, el rendimiento de la caldera en porcentaje, aplicando la ecuación 2.5 del método indirecto fue de:

$$\eta_{cal.} = 70,39 \% \quad (\text{Respuesta 3.2})$$

3.2.3 Consumo de energía actual

El consumo de energía de los equipos que intervienen en el sistema de generación de vapor de la caldera YB701C son las que se muestran en la Tabla 3.13; el tiempo de operación es de 5712 horas al año.

Para los cálculos se emplearon las Ecuaciones. 2.33; 2.34; 2.35; 2.36; 2.37 y 2.38.

A continuación el detalle de los equipos que actúan en el proceso:

Tabla 3.13 Consumo actual de energía

Equipo	Cant.	Potencia (kW)	Consumo de energía por hora	Consumo de energía anual
			(kWh)	(kWh)
B. alimentación de agua tratada al deareador	1	2,08	2,08	11868,52
Bomba de alimentación de agua a la caldera	1	13,96	13,96	79733,99
Motor del soplador de aire	1	6,65	6,65	38004,35
Bomba de químicos - Secuestrante	1	0,75	0,75	6174,75
Bomba de químicos- Acondicionador	1	0,75	0,75	6174,75
TOTAL:			24,19	141.956,37

3.3 Rendimiento de la caldera

El rendimiento de un generador de vapor se define como la relación entre el calor transferido al agua (vapor) y el contenido energético del combustible. Uno de los objetivos relacionados con la operación, el mantenimiento y el control de una caldera es maximizar su eficiencia térmica. (Lipták *et al.*, 2006)

El rendimiento está influenciado debido a:

- ✓ Minimizar el exceso de aire;
- ✓ La carga de la caldera;
- ✓ Cuando la presencia de monóxido de carbono (CO) u opacidad es lo mínimo.
- ✓ La temperatura de los gases de combustión;
- ✓ Condiciones de operación de la caldera;
- ✓ Mantenimiento que se efectúe a la caldera.

Descartando fracciones no muy importantes, se ecuación del rendimiento de la combustión es la siguiente:

$$\eta_{Comb} = 100 \cdot \left\{ 1 - 10^{-3} \left(0,22 + \frac{K \cdot y}{1 - \frac{y}{0,21}} \right) \cdot (T_h - T_a) - \frac{H_C}{H_C} \right\} \quad (\text{Ecuación 3.1})$$

Siendo:

η_{Comb} : Rendimiento de la combustión

y: Fracción molar de oxígeno en el gas de combustión

K: Coeficiente de cada combustible (1,07 para gas natural)

H_C/H_C : Función del combustible (0,09 para gas natural)

T_h : Temperatura humos (°F)

T_a : Temperatura ambiente (°F)

Los rendimientos conseguidos en condiciones iniciales, los cuales se obtuvieron del analizador de gases portátil de marca Testo, modelo 330, son los que se detallan en la Tabla 3.9.

3.3.1 Quemador Webster JB3C-75

El quemador que emplea la caldera YB701C es de la marca Webster, modelo JB3C, el cual puede emplear como combustible el gas o el diésel (que se emplea en casos de emergencia).

A continuación las dimensiones principales del quemador Webster:

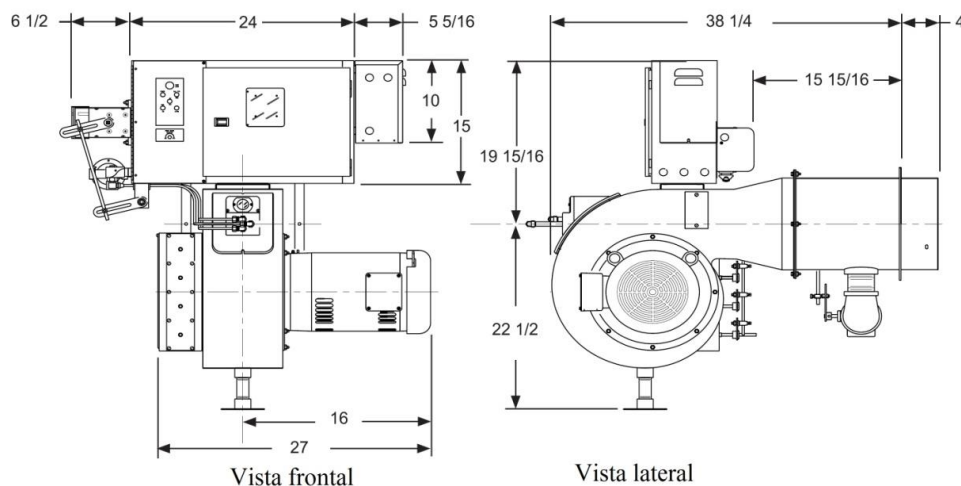


Figura 3.3 Dimensiones del Quemador Webster JB3C

Fuente: <http://www.webster-engineering.com/>

Las especificaciones del quemador, se muestran Tabla 3.14 están a su máxima capacidad; con una temperatura de 32 °C (90 °F) y 304,8 m.s.n.m (1000 pies).

Tabla 3.14 Especificaciones del quemador JB3C-75

Modelo	Capacidad maxima del quemador		Presion del gas Pa (pulg/agua)	Motor del quemador kW (hp)	Presion atomización diésel Pa (pulg/ agua)
	Gas kWh (scfh)	Diésel m ³ /h (gph)			
JB3C-75	3077 (10500)	0,28 (75)	871,8 (3,5)	5,59(7,5)	249,1 (1)

Fuente: <http://www.webster-engineering.com/>

Algunas pautas sobre la disminución de la capacidad del quemador:

- ✓ La capacidad decrece en 4% por cada 304,8 m (1000 pies) sobre la altitud de 304,8 m (1000 pies).
- ✓ Disminuye la capacidad en un 6 % por cada pulgada de presión en el quemador.
- ✓ Disminuye la capacidad en un 2 % por cada 5,55 °C (10 °F) de incremento en la temperatura aire de 32 °C (90 °F).

Los porcentajes de oxígeno aceptables en el quemador Webster son:

Tabla 3.15 Porcentaje de oxígeno (O₂) aceptables en el quemador

Gas Natural		
Capacidad (%)	Oxígeno (O ₂) % Mín.	Oxígeno (O ₂) % Máx.
30	5,0	7,0
40	4,0	7,0
50	3,0	5,0
100	3,0	5,0

Fuente: <http://www.webster-engineering.com/>

3.3.2 Análisis de los gases de combustión

Se considera el promedio de los cinco meses, respecto a las condiciones iniciales.

Nitrógeno (N₂)

El nitrógeno es el principal componente (79 % de volumen) del aire. Este gas incoloro, inodoro y sin sabor alimenta a la combustión como parte del aire de combustión pero no interviene directamente en el proceso de combustión. Actúa como un material de lastre y como transporte del calor de los residuos y se libera otra vez a la atmósfera. No obstante, cantidades pequeñas de este aire de combustión relacionado con el nitrógeno son, junto con el nitrógeno liberado del combustible, responsables de la formación de óxidos nitrógenos peligrosos.

El promedio que se consiguió fue de 19 ppm, valor que no representa muy peligroso.

Dióxido de carbono (CO₂)

El dióxido de carbono es un gas incoloro, inodoro con un ligero sabor agrio. Se produce en todos los procesos de combustión incluyendo la respiración.

Contribuye considerablemente al efecto invernadero gracias a su capacidad de filtrar la radiación de calor, en el ambiente la concentración es de 0,03 %; a concentraciones superiores a 15 % se produce una pérdida inmediata de conciencia.

Se logró un 6% de promedio, lo cual es moderado este valor pero no muy peligroso.

Oxígeno (O₂)

La parte de oxígeno que no se ha consumido en el proceso de combustión permanece como parte de los gases de combustión y es una medida para el rendimiento de la combustión. Se utiliza para determinar los parámetros de combustión y también actúa como valor de referencia.

El valor promedio obtenido fue del 12,5 %, lo que significa que tenía una combustión incompleta.

Monóxido de carbono (CO)

El monóxido de carbono (CO) es un gas incoloro, inodoro y tóxico, que se forma durante la combustión incompleta de hidrocarburos. Al aire libre el CO no es muy peligroso para las personas ya que reacciona rápidamente y pasa a CO₂ con el oxígeno. No obstante, en espacios cerrados o interiores debe considerarse como muy peligroso, ya que en concentraciones de tan sólo 700 ppm en el aire que respiramos puede conducir a la muerte en pocas horas.

Se verificó que se tenía en promedio 1253 ppm lo que significa una combustión incompleta, además de peligroso para la salud

3.4 Análisis de la combustión en el hogar mediante el método de elementos finitos (MEF) en condiciones iniciales

Para este procedimiento se inició dibujando con el software Autodesk Inventor 2015, los elementos del quemador y el hogar donde se realiza la combustión (Figura 3.4). Las dimensiones de los mismos, están en base a planos y medidas realizadas en campo, así como el número de boquillas de ingreso de gas principal y secundario de combustible y las entradas de aire principal y secundario se detallan en la Tabla 1.6.

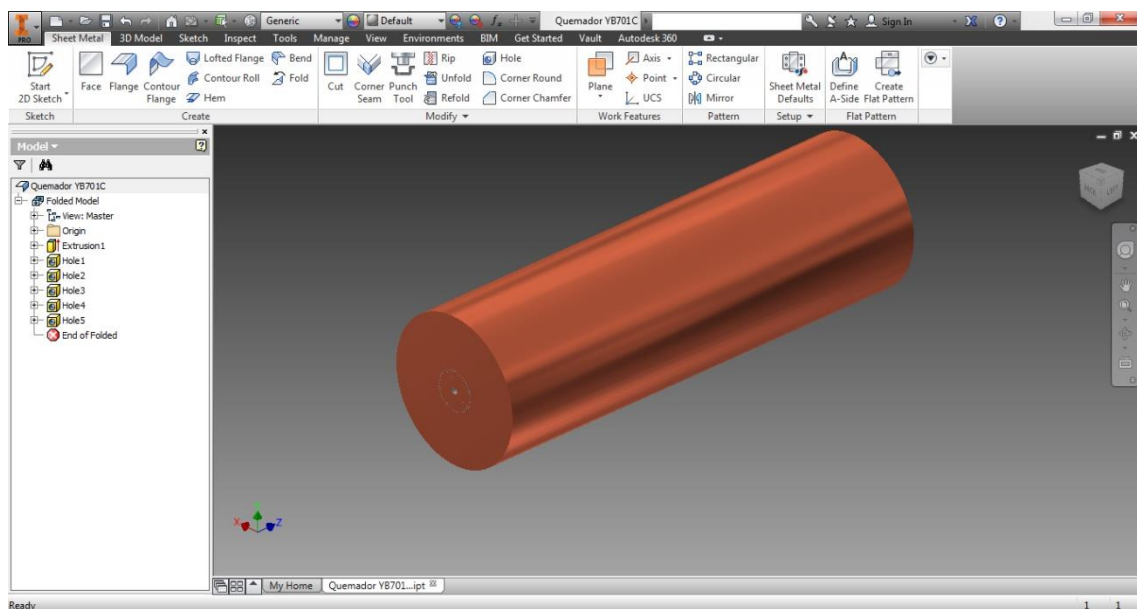


Figura 3.4 Esquema del quemador y la cámara de combustión

Para la utilización del ANSYS 17.0, primeramente se importa el dibujo de Inventor; con las condiciones iniciales (antes de la calibración) de flujo de gas combustible y aire (Tabla 3.16) y con la información de las Tablas 3.3 y 3.5, se procedió a programar.

Tabla 3.16 Condiciones iniciales de los flujos de gas combustible y aire

Descripción	Valor	Unidad
Flujo de combustible principal de cada inyector (Q_{Cpri})	0,00097356	kg/s
Flujo de combustible secundario de cada inyector (Q_{Csec})	0,00097356	kg/s
Flujo de aire primario ($Q_{Air-pri}$)	1,6642	kg/s
Flujo de aire secundario ($Q_{Air-sec}$)	0,3962	kg/s

En la geometría (Geometry), se establece que el cuerpo es para fluidos (Figura 3.5).

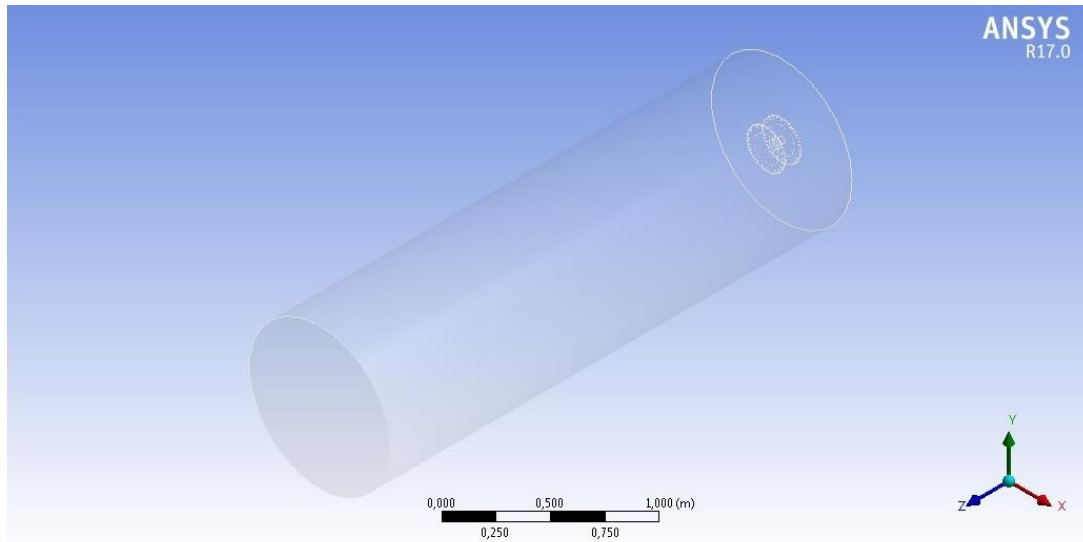


Figura 3.5 Geometría del cuerpo

Posterior se implanta las dimensiones del mallado del elemento, además se indica cuáles son las entradas (inyección de gas combustible primario, inyección de gas combustible secundario, el ingreso de aire primario y del aire secundario) y cuál es la salida de los gases de combustión (Figura 3.6).

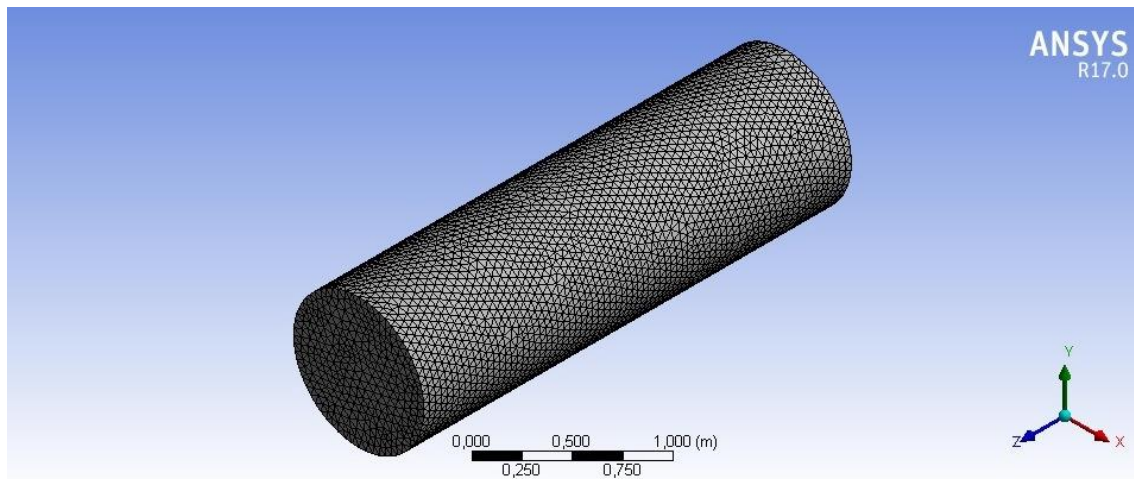


Figura 3.6 Mallado del elemento

Para el mallado en el ANSYS se estableció lo indicado en la Tabla 3.17.

Tabla 3.17 Características del mallado

Descripción	Valor	Unidad
Tipo de elemento	FLUENT	
Tamaño del elemento	$3,1416 \times 10^{-3}$	m
Tamaño mínimo malla	$1,6282 \times 10^{-3}$	m
Número de nodos	439955	un
Numero de elementos	2431649	un

Así mismo en la programación se especificó en fracción de moles las características del gas combustible y características del aire (Figura 3.7).

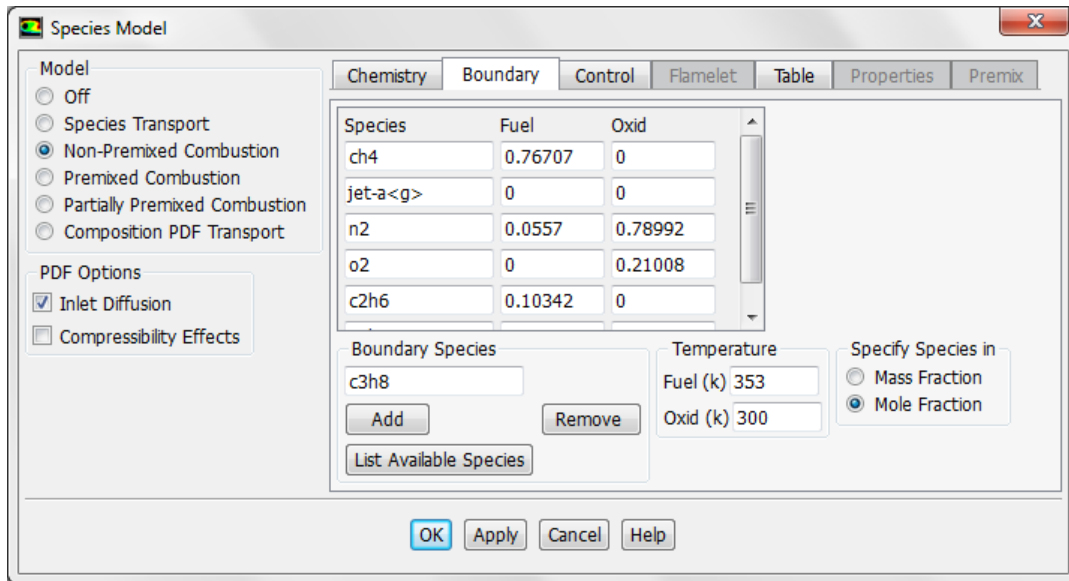


Figura 3.7 Valores de las características del gas combustible y del aire

Previo al inicio del cálculo con el programa, se estableció primeramente para el análisis 3500 interacciones o cálculos (Figura 3.8), con lo que se consiguió una mayor exactitud en los resultados.

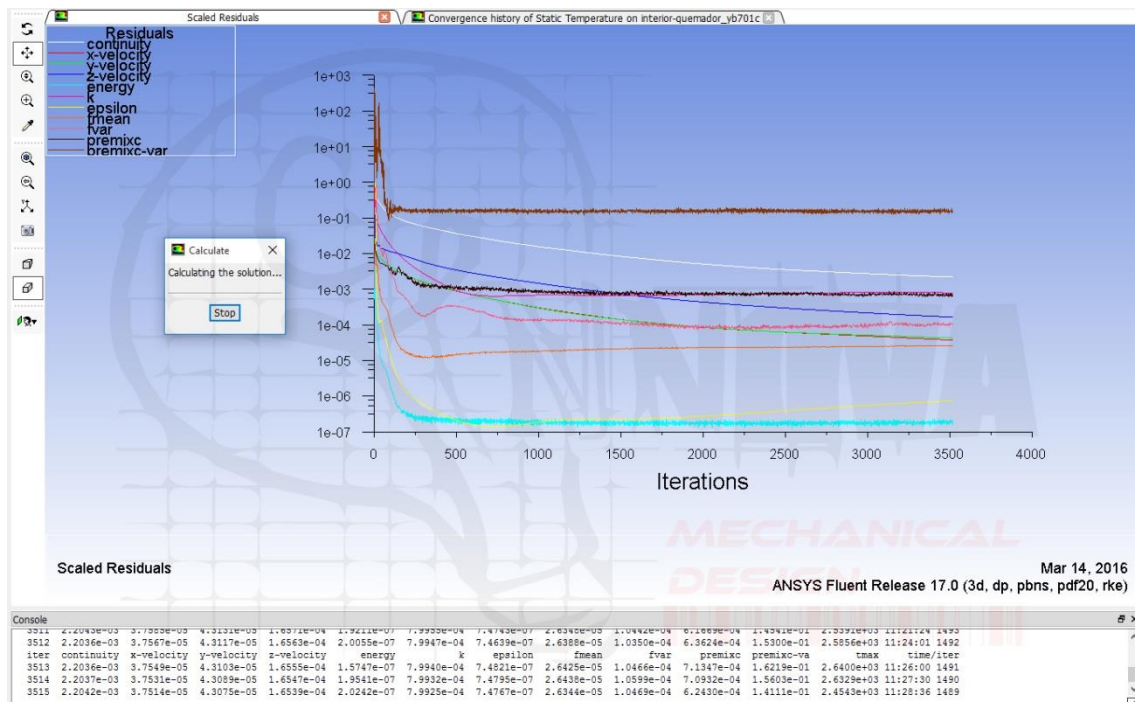


Figura 3.8 Inicio de la simulación

A continuación los resultados en condiciones iniciales (antes de la calibración):

En la Figura 3.9 se aprecia el entorno de la magnitud velocidad de la combustión.

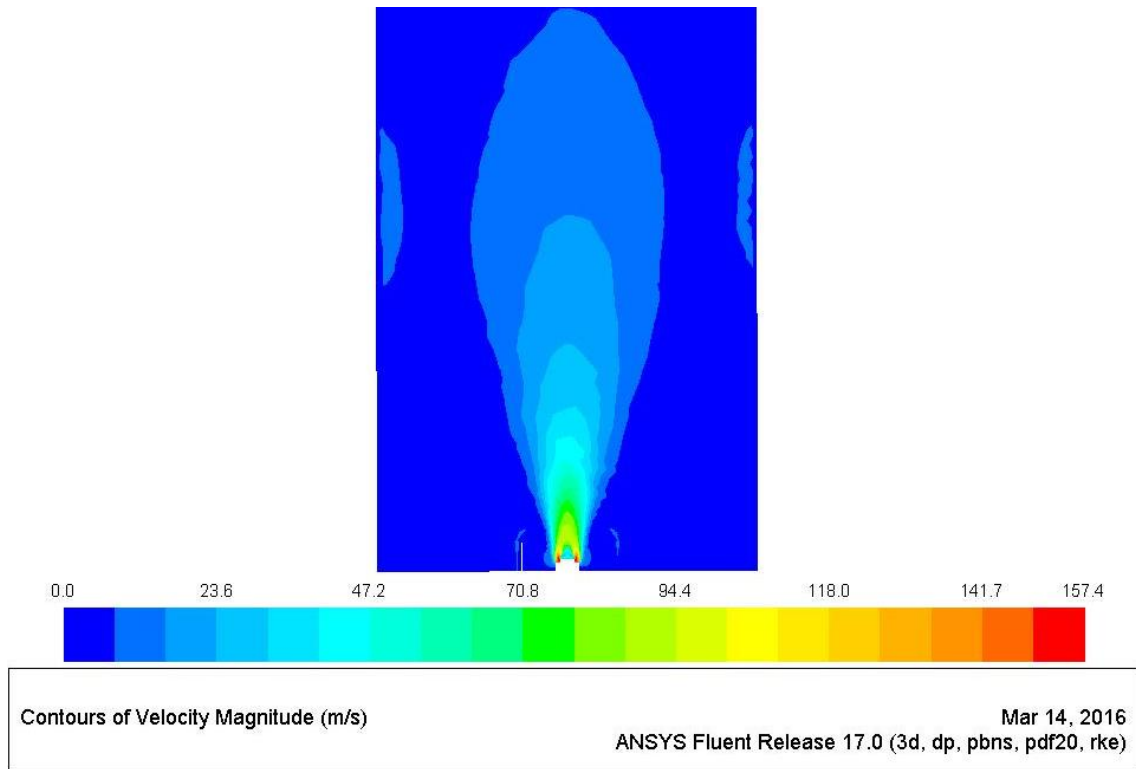


Figura 3.9 Contorno de la velocidad de la combustión

En la figura 3.10 se aprecia el entorno del número de Reynolds de la combustión.

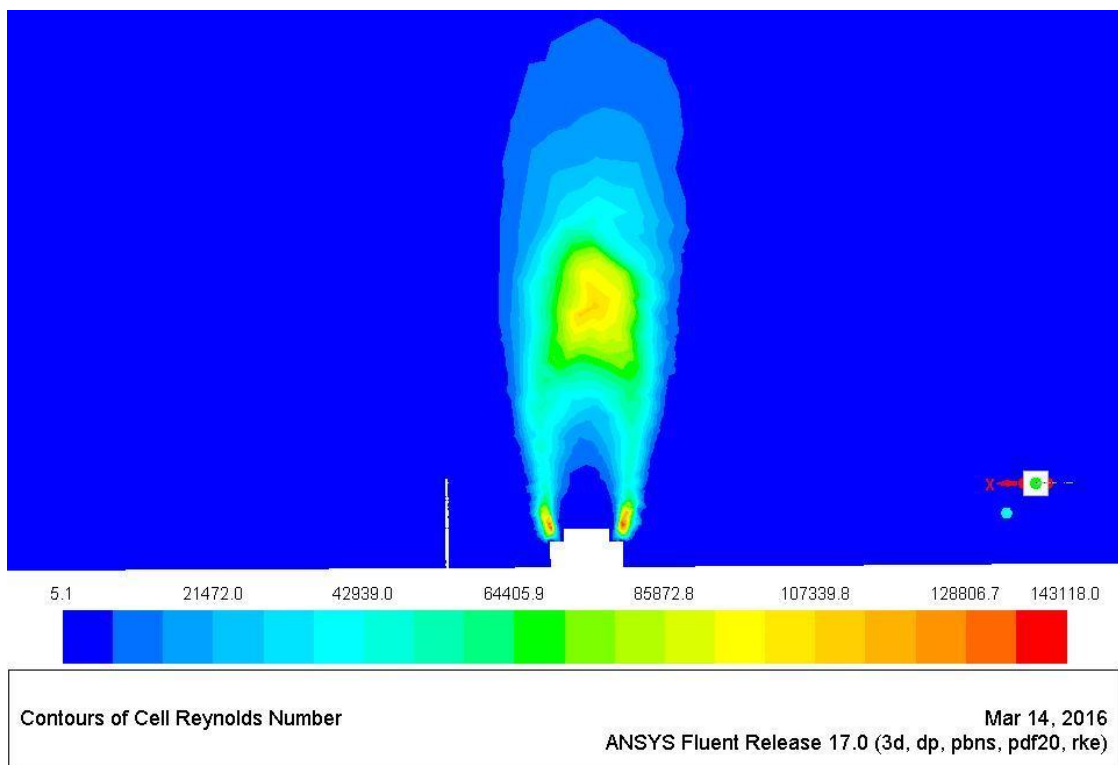


Figura 3.10 Entorno del número de Reynolds

La temperatura estática en el hogar o cámara de combustión (Figura 3.11).

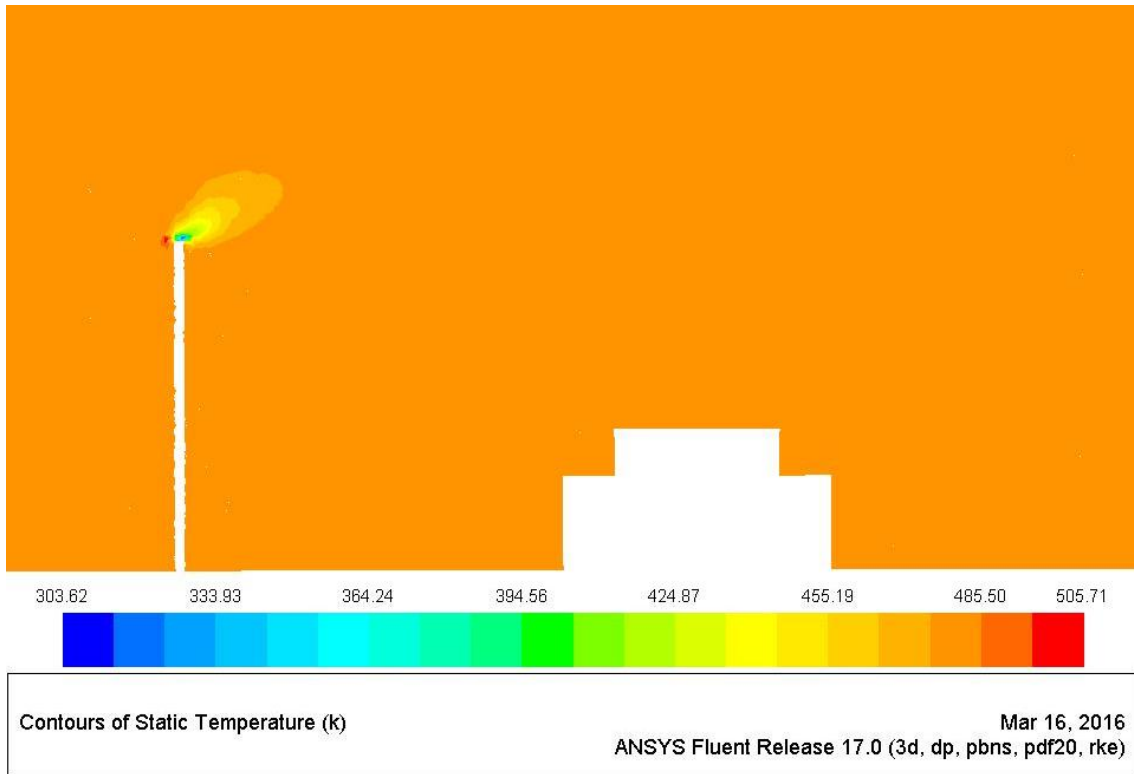


Figura 3.11 Contorno de la temperatura estática en el hogar

Así mismo el entorno de la viscosidad turbulenta de la combustión en el hogar (Figura 3.12).

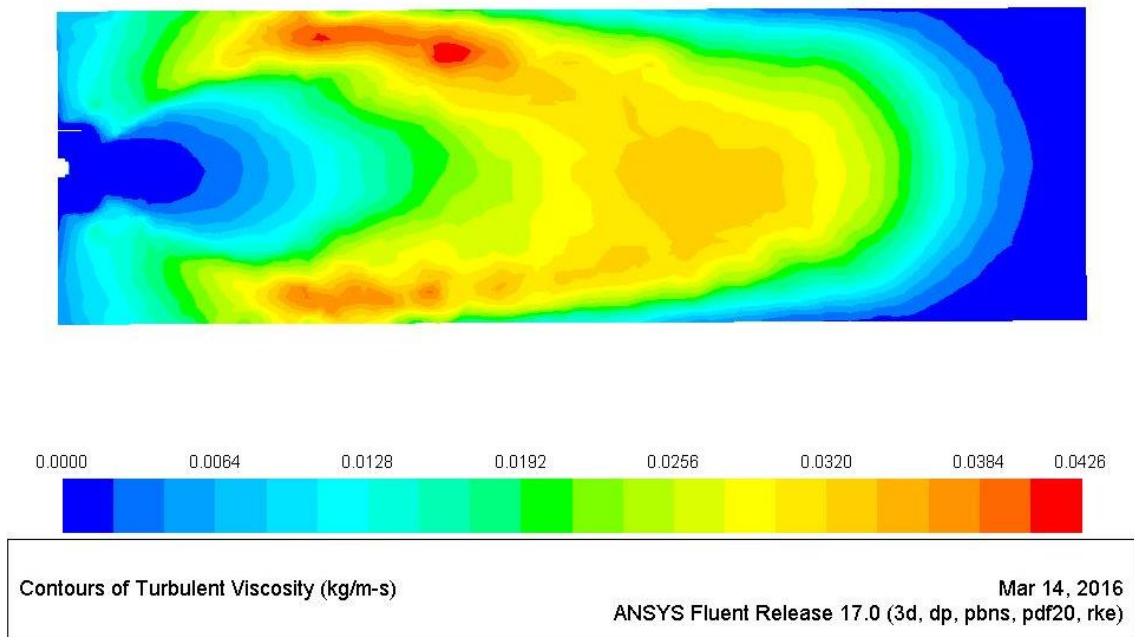


Figura 3.12 Contorno de la viscosidad turbulenta

Se aprecia el entorno de la conductividad térmica efectiva en el hogar (Figura 3.13).

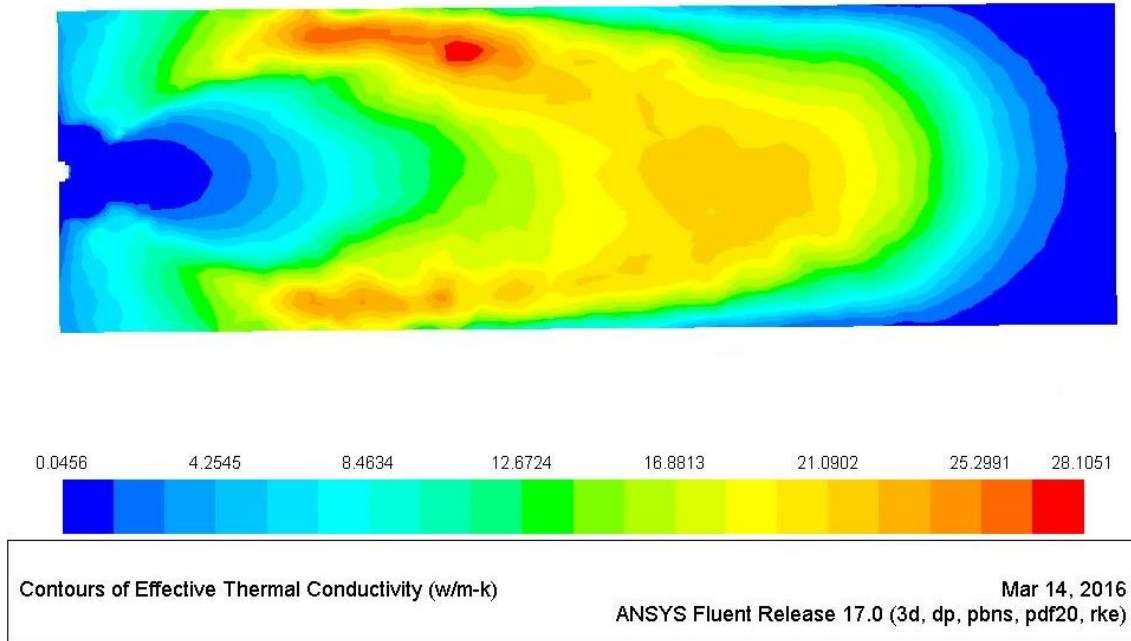


Figura 3.13 Contorno de la conductividad térmica efectiva

Además se muestra el desequilibrio de la masa dentro del hogar de la caldera, que es la mezcla no efectuada en la combustión (Figura 3.14).

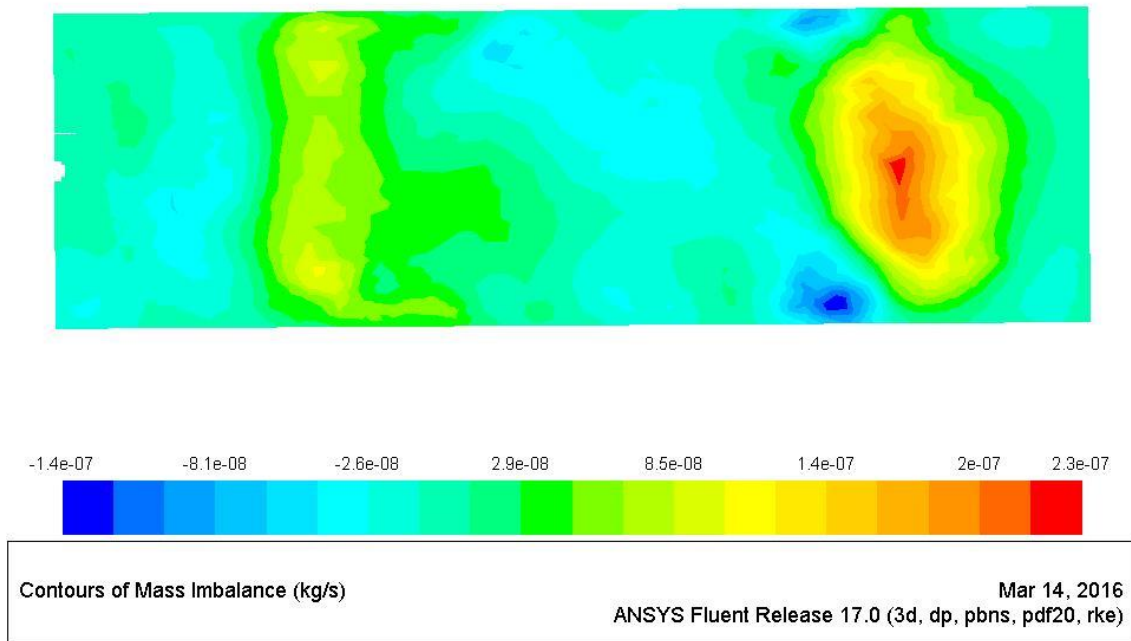


Figura 3.14 Contorno de desequilibrio de la masa

Se detalla en la Tabla 3.18 los resultados de la simulación en condiciones iniciales (antes de calibrar o controlar los parámetros operacionales para la combustión):

Tabla 3.18 Resumen de la simulación en condiciones iniciales

Medida	Valor Mínimo	Valor Máximo	Unidad
Velocidad de la flama	0	157,4	m/s
Número de Reynolds	5,1	143118	
Temperatura estática	303,62	507.71	K
Viscosidad Turbulenta	0	0,0426	kg/m's
Conductividad térmica efectiva	0,0456	28,10	W/m·K
Masa no balanceada	-1,40x10 ⁷	2,30x10 ⁷	kg/s

3.5 Mediciones de los parámetros del agua de la caldera

La evaluación de la información proporcionada por el personal de Laboratorio, corresponde al periodo de tres meses, respecto a las características del agua de alimentación a la caldera para la generación de vapor; estos valores se midieron con el equipo analizador de agua de marca Orion Versa Star, las mediciones fueron las siguientes:

Tabla 3.19 Valores de los parámetros del agua de la caldera

Producto	Unidad	Tanque almacenamiento		Caldera YB701C	
		Espec.	Obtenido	Espec.	Obtenido
Alcalinidad F (CO ₃ Ca)	ppm			80-600	1023,5
Alcalinidad M (CO ₃ Ca)	ppm			110-800	1233,5
Alcalinidad 2F-M (CO ₃ Ca)	ppm			80-400	1223,5
Cloruros (Cl)	ppm			<50	185,5
Conductividad	μS/cm	<20	53,5	<3000	6495
Dureza Total (CO ₃ Ca)	ppm	<1	0	<1	10
pH		>7	6,1	11-11,8	12,5
Sólidos totales disueltos (STD)	ppm		26	<1500	3181
Hierro (Fe ⁺⁺)	ppm			<1	0,32

Espec.- Especificación

Algunos valores del agua de alimentación para las calderas, de acuerdo a la Tabla 3.19, se encuentran por encima de lo especificado, por lo que se ve necesario que personal de operación y mantenimiento verifiquen el sistema y el control de dosificación de químicos.

El consumo de agua que se obtuvo al operar la caldera YB701C, operando el equipo por un tiempo de una hora a su máxima carga de generación de vapor para las dos refineras fue de 3,5 m³/h, este experimento se lo realizó en conjunto con el personal de operación.

3.6 Comprobación de la hipótesis

3.6.1 Comprobación mediante el Chi-Cuadrado. Se efectuaron los cálculos utilizando las ecuaciones del Capítulo 2, se emplearon los datos de las condiciones iniciales (antes de la calibración) y de las condiciones finales (después de la calibración) del Capítulo 3 y 4.

Planteamiento de la hipótesis:

H₀: El control de los parámetros operacionales no reduce el consumo de combustible y tampoco incrementa la eficiencia de la caldera pirotubular YB701C.

H₁: El control de los parámetros operacionales reduce el consumo de combustible e incrementa la eficiencia de la caldera pirotubular YB701C.

Las frecuencias observadas (Tabla 3.20) que se alcanzaron fueron las siguientes:

Tabla 3.20 Frecuencias observadas (*f_o*)

CONDICIONES	ALTERNATIVAS		TOTAL
	Actual	Proyectada	
Oxígeno (O ₂) en los gases (%)	12,50	4,40	16,90
Exceso de aire (%)	133,50	23,90	157,40
Rendimiento de la combustión (%)	79,60	83,80	163,40
Eficiencia térmica de la caldera (%)	70,39	78,81	149,20
TOTAL:	225,60	112,10	337,70

Las frecuencias esperadas (Tabla 3.21) que se alcanzaron fueron las siguientes:

Tabla 3.21 Frecuencias esperadas (*f_e*)

CONDICIONES	ALTERNATIVAS	
	Actual	Proyectada
Oxígeno (O ₂) en los gases (%)	11,29	5,61
Monóxido de carbono (CO) en los gases (ppm)	105,15	52,25
Rendimiento de la combustión (%)	109,16	54,24
Eficiencia térmica de la caldera (%)	99,67	49,53

La determinación del Chi-cuadrado mediante ecuaciones que se indican en el Capítulo 2, se detallan en la Tabla 3.22.

Tabla 3.22 Determinación Chi-Cuadrado (X^2)

CONDICIONES	f_o	f_e	$(f_o - f_e)^2 / f_e$
Oxígeno (O ₂) en los gases (%) Actual	12,50	11,29	0,13
Oxígeno (O ₂) en los gases (%) Proyectada	4,40	5,61	0,26
Monóxido de carbono (CO) en los gases (ppm) Actual	133,50	105,15	7,64
Monóxido de carbono (CO) en los gases (ppm) Proyectada	23,90	52,25	15,38
Rendimiento de la combustión (%) Actual	79,60	109,16	8,00
Rendimiento de la combustión (%) Proyectada	83,80	54,24	16,11
Eficiencia térmica de la caldera (%) Actual	74,27	102,26	7,66
Eficiencia térmica de la caldera (%) Proyectada	78,81	50,82	15,42
		$X^2 =$	70,61

Los grados de libertad que se obtuvo (ecuación 2.44) fue: 3 (tres)

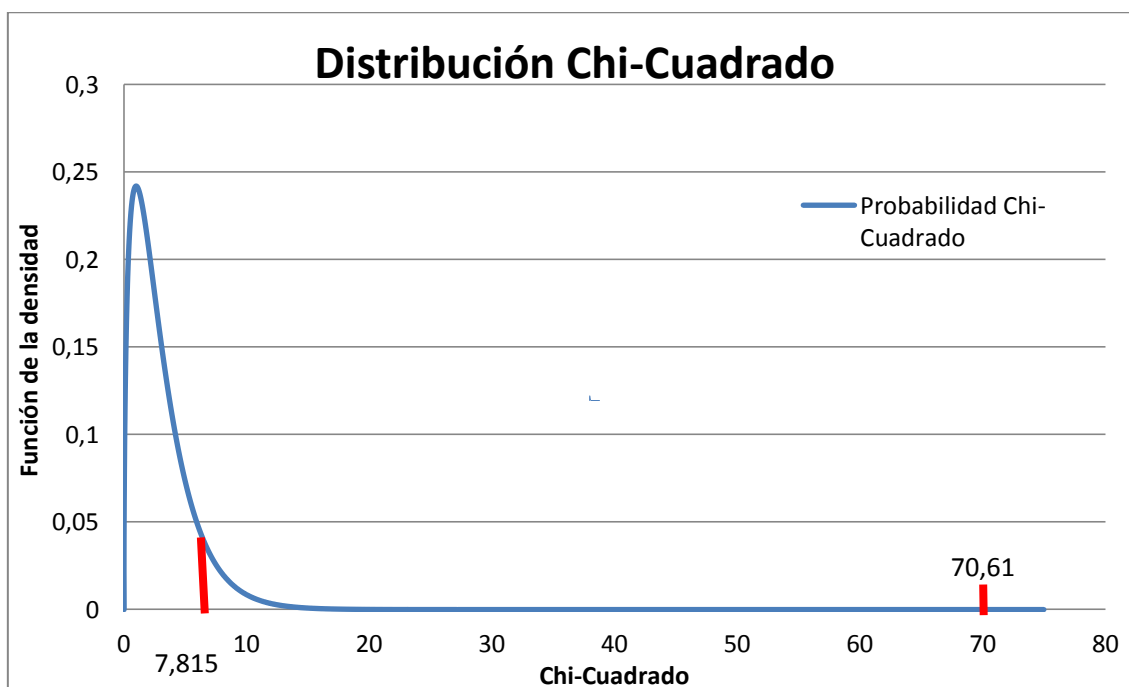


Figura 3.15 Distribución Chi-Cuadrado

A continuación un tabla resumen de los valores conseguidos:

Tabla 3.23 Valores de la prueba chi-cuadrado

Descripción	Valor
Nivel de confianza	95 %
Nivel de significancia (α)	5 %
Grados de libertad (Gl)	3
Chi-cuadrado calculado (X^2)	68,79
Chi-cuadrado de la tabla (X^2_{α})	7,815

Para la comprobación se establece un nivel de confianza del 95 % y un nivel de significancia de 5 % son valores comunes para determinar la probabilidad de que ocurra, con tres grados de libertad que se consiguió, se tiene que el Chi-cuadrado de la tabla es de 7,815 [Anexo 12].

Comprobación:

Al evidenciar que

$$X^2 > X^2_{\alpha}$$

$$70,71 > 7,815$$

Por lo tanto, en vista que el valor de Chi-cuadrado calculado es mayor que el Chi-cuadrado de la tabla, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa, donde “El control de los parámetros operacionales reduce el consumo de combustible e incrementa la eficiencia de la caldera pirotubular YB701C”.

3.6.2 Comprobación de la hipótesis de forma técnica. Para la demostración de la hipótesis de manera técnica, se emplearon los resultados conseguidos del Capítulo 3 y 4, el detalle se muestra en la Tabla 3.24.

Tabla 3.24 Valores conseguidos para demostración hipótesis

Parámetros	Condición inicial	Condición final
Oxígeno (O ₂) en los gases (%)	12,50	4,40
Exceso de aire (%)	133,50	23,90
Rendimiento de la combustión (%)	79,60	83,80
Rendimiento de la caldera (%)	70,39	78,81
Consumo de combustible (kg/h)	168,2	152,7

Por lo tanto se cumple la hipótesis, debido a que fue posible la reducción del consumo de gas combustible de 168,2 kg/h a 152,7 kg/h, y el incremento en el rendimiento de la combustión y de la caldera en 4,2 % (83,8 % - 79,6 %) y 8,4 % (78,81 % - 70,39 %) respectivamente, lo que significa un ahorro considerable para la empresa y por ende para el país, así mismo el de mejorar las condiciones de los gases producto de la combustión al ambiente

3.7 Conclusiones del capítulo

- ✓ La determinación del rendimiento de la caldera mediante los métodos directos e indirectos, fueron de 74,98 % y 70,39 % respectivamente.
- ✓ Se cuantifica y se evidencia el comportamiento de la combustión en el hogar de la caldera en condiciones iniciales, mediante el software ANSYS 17.0.

CAPÍTULO 4

PROPUESTA DE MEJORAMIENTO PARA LA CALDERA YB701C

4.1 Título de la propuesta

Calibración de los parámetros de la combustión, para dos tipos de gases combustibles de distintas características químicas y la innovación de un nuevo analizador de gases para la caldera YB701C, para el incremento de la eficiencia energética, disminución del consumo de combustible y mejoramiento de las condiciones ambientales.

4.2 Justificación

Mediante la calibración de los parámetros de la combustión se consiguió un incremento en la eficiencia térmica y en el rendimiento de la combustión de la caldera, con lo que se logró optimizar los recursos energéticos y económicos de la empresa, además de ayudar a mejorar las condiciones de las emisiones hacia el ambiente, producto de la combustión y por lo tanto lograr el objetivo primordial de este proyecto de estudio.

Con la innovación de un nuevo analizador de gases en línea de marca Honeywell, modelo Slate, se conseguirá programar diferentes curvas, estando el equipo en funcionamiento, lo cual podrá ser confirmado con el analizador de gases portátil de marca Testo.

4.3 Objetivos

Objetivo general de la propuesta

- ✓ Determinar cómo incide la calibración de los parámetros de la combustión y la innovación de un nuevo analizador de gases para la caldera YB701C, en el incremento de la eficiencia energética, disminución del consumo de combustible y el mejoramiento de las condiciones de las emisiones a la atmósfera.

Objetivos específicos de la propuesta

- ✓ Incrementar la eficiencia energética del equipo, mediante la detección de oportunidades de mejora.
- ✓ Detectar los parámetros de la combustión y establecer como éstos se relacionan entre sí.
- ✓ Reducir el consumo energético y promover la sostenibilidad económica, política y ambiental de la empresa.

4.4 Estructura de la propuesta

- ✓ Establecer la relación combustible – aire que ingresa al quemador de la caldera.
- ✓ Analizar las emisiones gaseosas, producto de la combustión, mediante el analizador portátil de gases de marca Testo.
- ✓ Verificación de los parámetros de operación, mediante el software de computación.
- ✓ Un estudio económico utilizando las herramientas del TIR y VAN, con el objeto de determinar la factibilidad del proyecto.

4.5 Desarrollo de la propuesta

4.5.1 Obtención de la relación aire / gas combustible

La respuesta de la caldera a los cambios de carga se limita generalmente al diseño del equipo y a las consideraciones de tiempo muerto. El período de oscilación de una caldera típica es de entre 2 y 5 min (Lipták *et al.*, 2006). Esta condición habitualmente se debe al retardo de los controladores de ingreso de aire, combustible y los efectos del nivel del agua.

El rendimiento de los controles de aire en las calderas tradicionales se ha visto limitado por el sensor de flujo de aire inexacto, sobre todo cuando las tasas de flujo de aire eran menos del 25%. Es precisamente que a bajas cargas, la caldera tiende a ser menos eficiente (Lipták *et al.*, 2006).

Luego de hacer los estudios preliminares, se realizó en esta propuesta para el mejoramiento de la eficiencia térmica y rendimiento de la combustión de la caldera, las siguientes actividades:

- ✓ Se efectuó una relación adecuada entre aire y combustible en el que se controló flujos de entrada de aire y flujos de ingreso de gas combustible, esto con diferentes cargas (flujos de combustión).
- ✓ Control de las emisiones a la atmósfera, que están estrechamente relacionados con los parámetros operacionales.
- ✓ Determinación de las propiedades de los dos tipos de gases combustibles que poseen distintas características, efectuado mediante las cromatografías del gas (Anexo 2), con lo cual se establecen las curvas entre aire y combustible.
- ✓ Se efectuó un análisis de las características del quemador, para determinar hasta cuanto se puede mejorar.

En las Tablas 4.1 y 4.2 se aprecian los resultados alcanzados de los dos tipos de gases combustibles, estos poseen distintas características, se analizaron y se efectuaron las calibraciones en la caldera en diferentes fechas, estos se les ha designado como:

- ✓ **Gas combustible Tipo 1 o Gas Tipo 1.-** Cromatografía y calibración en el mes de octubre 2015
- ✓ **Gas combustible Tipo 2 o Gas Tipo 2.-** Cromatografía y calibración en el mes de abril 2016

A continuación los detalles:

Tabla 4.1 Valores conseguidos en la calibración - Gas combustible Tipo 1

Fecha	Gas combustible (%)	Aire (%)	Carga (%)	VDV (%)	Exceso de aire (%)	η_{Comb} %	Consumo Combustible Q_C (kg/h)
25/10/2015	7	7	10	28	25	84,0	13,5
25/10/2015	11	12	18	36	20	84,9	21,3
25/10/2015	14	16	26	44	24	84,5	27,1
25/10/2015	17	19	35	50	25	84,4	32,8
25/10/2015	22	25	43	55	21	83,8	42,5
25/10/2015	27	30	51	59	20	84,0	52,2
25/10/2015	31	39	59	60	21,7	83,6	59,9
25/10/2015	40	45	67	65	25	83,4	77,3
25/10/2015	48	51	75	66	24	83,1	92,8
25/10/2015	56	61	84	68	25	82,7	108,2
25/10/2015	79	70	90	82	25	82,9	152,7

Tabla 4.2 Valores conseguidos en la calibración - Gas combustible Tipo 2

Fecha	Gas combustible (%)	Aire (%)	Carga (%)	VDV (%)	Exceso de aire (%)	η_{Comb} %	Consumo Combustible Q_C (kg/h)
17/04/2016	7	10	10	28	26,7	84,3	13,5
17/04/2016	11	15	18	30	24,5	83,7	21,3
17/04/2016	14	20	26	35	17,4	84,1	27,1
17/04/2016	17	24	35	37	19,8	82,5	32,8
18/04/2016	22	31	43	43	21,8	83,2	42,5
18/04/2016	27	35	51	47	20	84,4	52,2
18/04/2016	31	43	59	48	18,6	84,5	59,9
18/04/2016	40	51	67	51	16,2	85,3	77,3
18/04/2016	48	56	75	53	15,6	85,5	92,8
18/04/2016	56	65	84	57	20	84,6	108,2
18/04/2016	79	76	90	60	18,6	84,7	152,7

La calibración de las curvas mediante el ajuste de los flujos de gas combustible y aire en el quemador de la caldera YB701C, se lo efectuó en conjunto con el personal de instrumentación.

Los valores de gas combustible y aire son en unidades de porcentajes, al igual que la carga (vapor generado) y el VDV (Variador de velocidad) del motor del soplador de aire. El Aire (%) se refiere al porcentaje de apertura del dámper del quemador.

Las relaciones de los parámetros que intervinieron en la combustión, fueron conseguidas con el programa Curve Expert 1.4., los resultados se detallan a continuación:

4.5.1.1 Correlación entre aire y flujo de gas combustible

La relación entre el aire y el flujo de gas combustible, de los dos tipos de gases, están en base a las tablas indicadas anteriormente (Tabla 4.1 y 4.2), por lo tanto para el gas combustible Tipo 1 es como se detalla en el siguiente esquema:

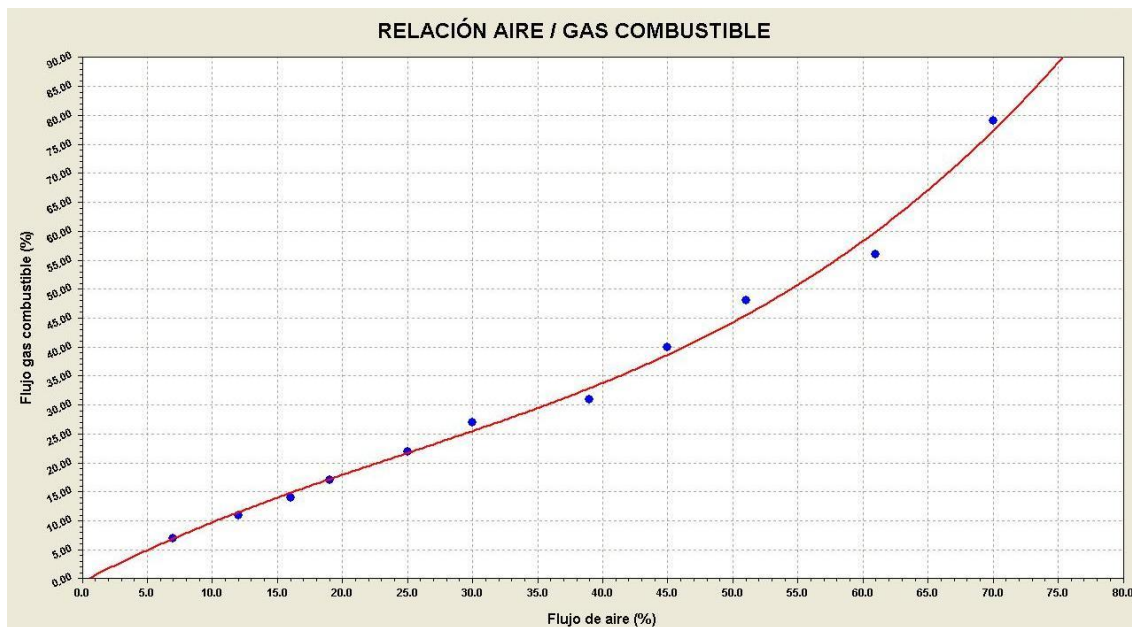


Figura 4.1 Relación entre el aire y flujo de gas combustible Tipo 1

La ecuación y los valores de la relación entre el aire y el flujo de gas combustible tipo 1, se aprecian en la Tabla 4.3:

Tabla 4.3 Valores de la relación aire y flujo de gas combustible Tipo 1

Parámetros	Resultados
Ecuación polinómica tercer grado:	$y = a+bx+cx^2+dx^3$
Datos de los coeficientes:	$a = -4,9613 \times 10^{-1}$ $b = 1,1776$ $c = -1,7385 \times 10^{-2}$ $d = 2,3515 \times 10^{-4}$
Error estándar:	2,0527
Coefficiente de correlación:	0,9970

Se emplea ecuación polinómica de tercer grado debido a una mejor precisión, tiene una desviación estándar de 2,05 y se tiene una correlación positiva aceptable con un valor del 0,997.

Para el gas combustible tipo 2 se muestra la Figura 4.2.

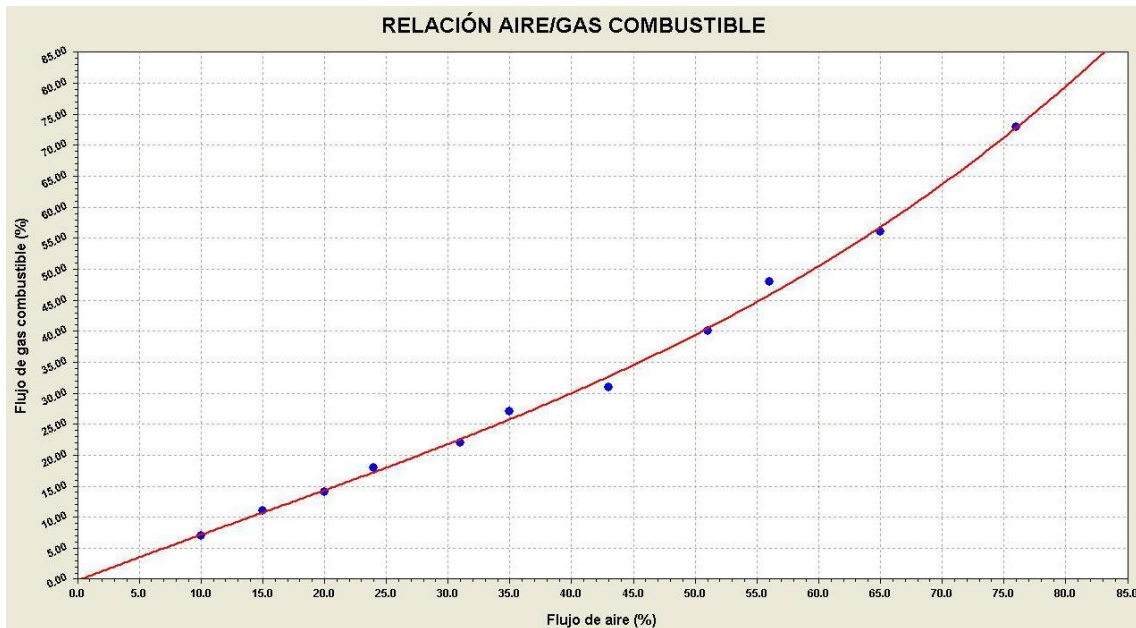


Figura 4.2 Relación entre el aire y flujo de gas combustible Tipo 2

La ecuación y los valores de la relación entre el aire y el flujo de gas combustible Tipo 2, se aprecian en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4 Valores de la relación aire y flujo de gas combustible Tipo 2

Parámetros	Resultados
Ecuación polinómica tercer grado:	$y = a+bx+cx^2+dx^3$
Datos de los coeficientes:	$a = -1,6817 \times 10^{-1}$ $b = 7,5996$ $c = -3,1832 \times 10^{-2}$ $d = 7,6809 \times 10^{-4}$
Error estándar:	1.2493
Coefficiente de correlación:	0,9987

Se emplea ecuación polinómica de tercer grado debido a una mejor precisión, tiene una desviación estándar de 1,24 y se tiene una correlación positiva aceptable con un valor del 0,998.

4.5.1.2 Correlación carga de la caldera y flujo de gas combustible

El nexos entre carga de la caldera que se refiere al vapor generado y el flujo de gas combustible tipo 1, es como se muestra en la Figura 4.3.

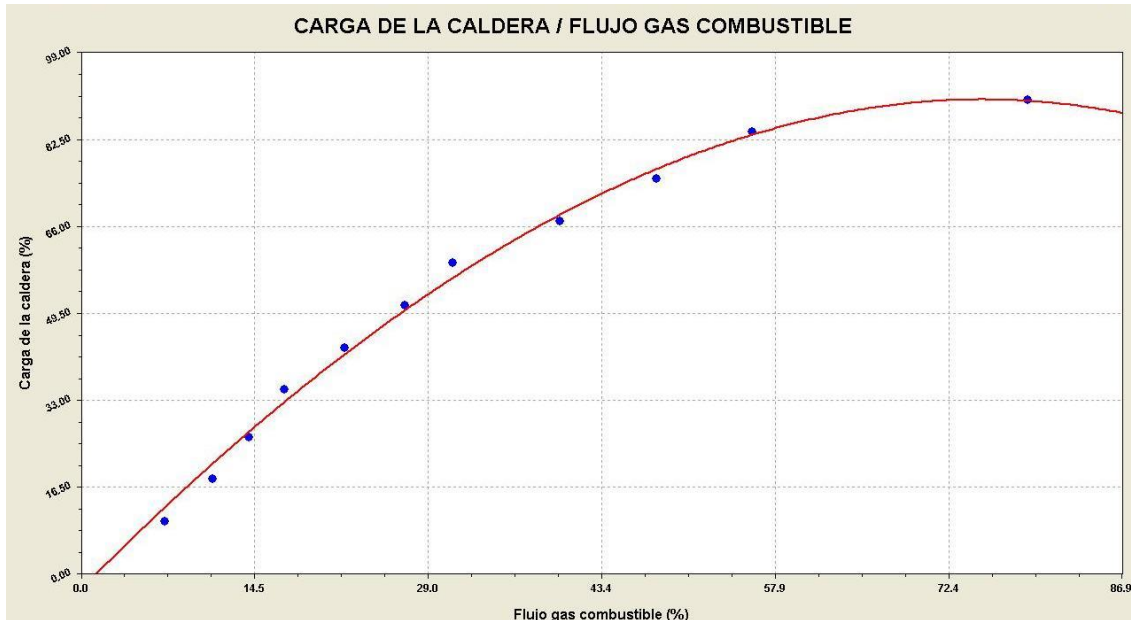


Figura 4.3 Comportamiento de la carga en función del gas combustible Tipo 1

Analizando la Figura 4.3, se observó que al estar operando el equipo hasta una carga del 84 % se tiene un consumo menor del combustible en comparación al 90 % de carga.

La ecuación y los valores de la relación carga (vapor generado) de la caldera en función del gas combustible se aprecian en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5 Valores relación carga en función del gas combustible Tipo 1

Parámetros	Resultados
Ecuación polinómica tercer grado:	$y = a+bx+cx^2+dx^3$
Datos de los coeficientes:	$a = -2,6977$ $b = 2,3038$ $c = -1.2057 \times 10^{-2}$ $d = -2,8855 \times 10^{-5}$
Error estándar:	2,4063
Coficiente de correlación:	0,9975

Se emplea ecuación polinómica de tercer grado debido a una mejor precisión, tiene una desviación estándar de 2,40 y se tiene una correlación positiva aceptable con un valor del 0,997.

El esquema para el gas combustible Tipo 2 (Figura 4.4) es la siguiente:

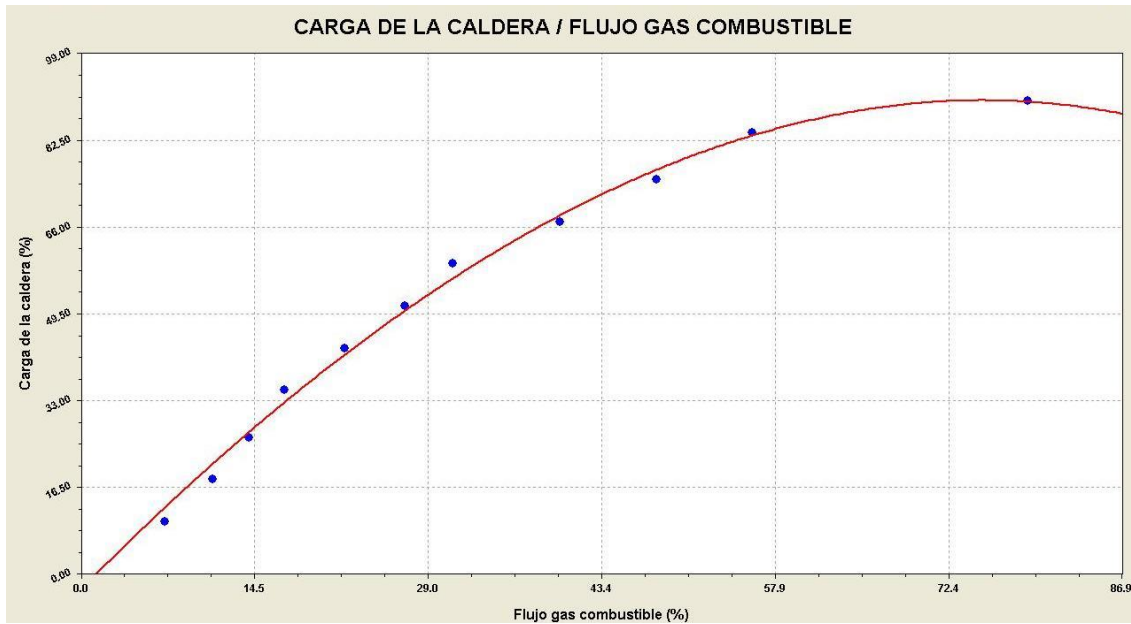


Figura 4.4 Comportamiento de la carga en función del gas combustible Tipo 2

Los valores de la Figuras 4.3 y 4.4 son similares, ya que la variación ocurrió en la inyección del flujo de aire en el quemador.

La ecuación y los valores de la relación carga (vapor generado) de la caldera en función del gas combustible Tipo 2 se aprecian en la Tabla 4.6.

Tabla 4.6 Valores relación carga en función del gas combustible Tipo 2

Parámetros	Resultados
Ecuación polinómica tercer grado:	$y = a+bx+cx^2+dx^3$
Datos de los coeficientes:	$a = -2,6977$ $b = 2,3038$ $c = -1.2057 \times 10^{-2}$ $d = -2,8855 \times 10^{-5}$
Error estándar:	2,4063
Coefficiente de correlación:	0,9975

Se emplea ecuación polinómica de tercer grado debido a una mejor precisión, tiene una desviación estándar de 2,40 y se tiene una correlación positiva aceptable con un valor del 0,997.

4.5.1.3 Correlación carga de la caldera y aire

La correspondencia entre la carga (vapor generado) de la caldera y el aire para la combustión, se muestra en el siguiente diagrama:



Figura 4.5 Comportamiento de la carga en función del aire - Gas Tipo 1

La ecuación y los valores de la curva de la Figura 4.5 se muestran en la Tabla 4.7.

Cabe indicar que el Aire en porcentaje, se refiere a la apertura del dámper del quemador, se puede apreciar en la Figura 1.4.

Tabla 4.7 Valores relación carga en función del aire - Gas Tipo 1

Parámetros	Resultados
Ecuación polinómica tercer grado:	$y = a+bx+cx^2+dx^3$
Datos de los coeficientes:	$a = -1,5802$ $b = 1,9365$ $c = -7.9422 \times 10^{-3}$ $d = -1,4752 \times 10^{-5}$
Error estándar:	2,0010
Coefficiente de correlación:	0,9983

Se emplea ecuación polinómica de tercer grado debido a una mejor precisión, tiene una desviación estándar de 2,00 y se tiene una correlación positiva aceptable con un valor del 0,998.

La correspondencia entre la carga de la caldera y el aire para la combustión, se muestra en la Figura 4.6.

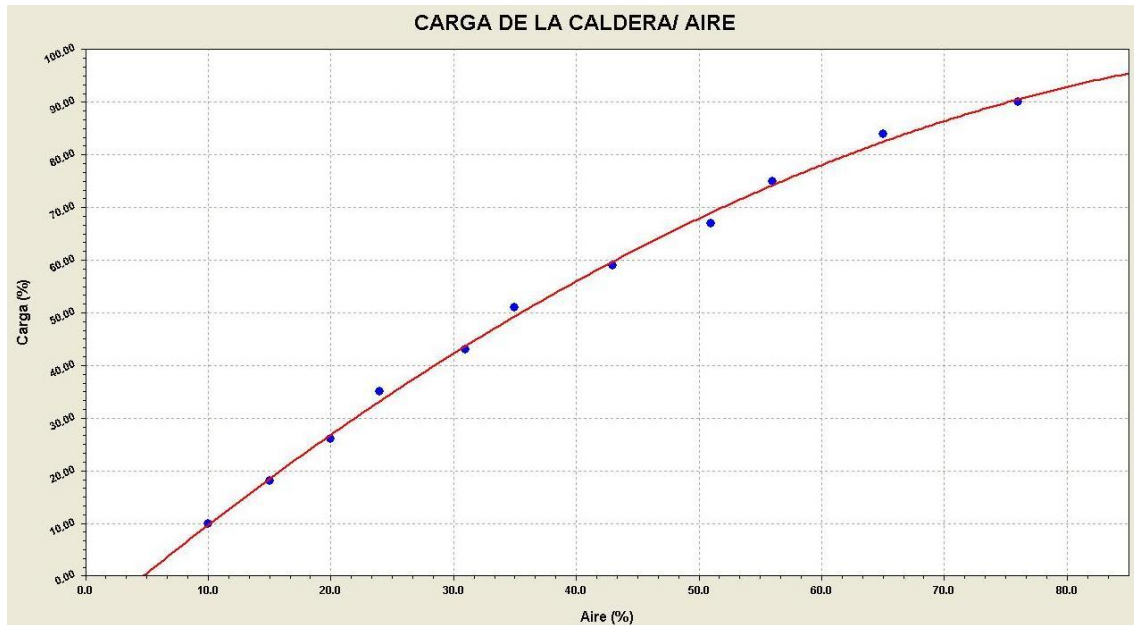


Figura 4.6 Comportamiento de la carga en función del aire – Gas Tipo 2

La ecuación y los valores de la curva (Figura 4.6) se muestran en la Tabla 4.8.

Cabe indicar que el Aire en porcentaje, se refiere a la apertura del dámper del quemador, se puede apreciar en la Figura 1.4.

Tabla 4.8 Valores relación carga en función del aire – Gas Tipo 2

Parámetros	Resultados
Ecuación polinómica tercer grado:	$y = a+bx+cx^2+dx^3$
Datos de los coeficientes:	$a = -9,0191$ $b = 1,9628$ $c = -8.2163 \times 10^{-3}$ $d = -4,8427 \times 10^{-6}$
Error estándar:	1,4759
Coefficiente de correlación:	0,9989

Se emplea ecuación polinómica de tercer grado debido a una mejor precisión, tiene una desviación estándar de 1,47 que es bastante aceptable y se tiene una correlación positiva aceptable con un valor del 0,998.

4.5.1.4 Relación entre rendimiento de la combustión y exceso de aire

El vínculo entre el rendimiento de la combustión y el exceso de aire, para el gas combustible Tipo 1 se muestra en la Figura 4.7.

Rendimiento de la combustión y el exceso de aire

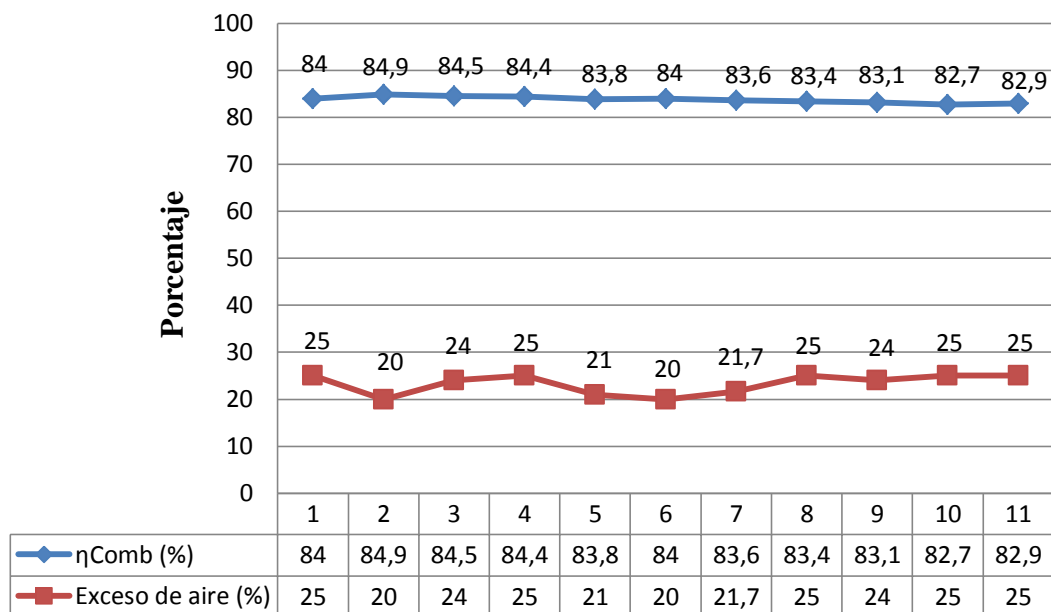


Figura 4.7 Comportamiento del rendimiento de la combustión en función del exceso de aire – Gas Tipo 1

La relación entre el rendimiento de la combustión y el exceso de aire, para el gas combustible Tipo 2 se muestra en la Figura 4.8.

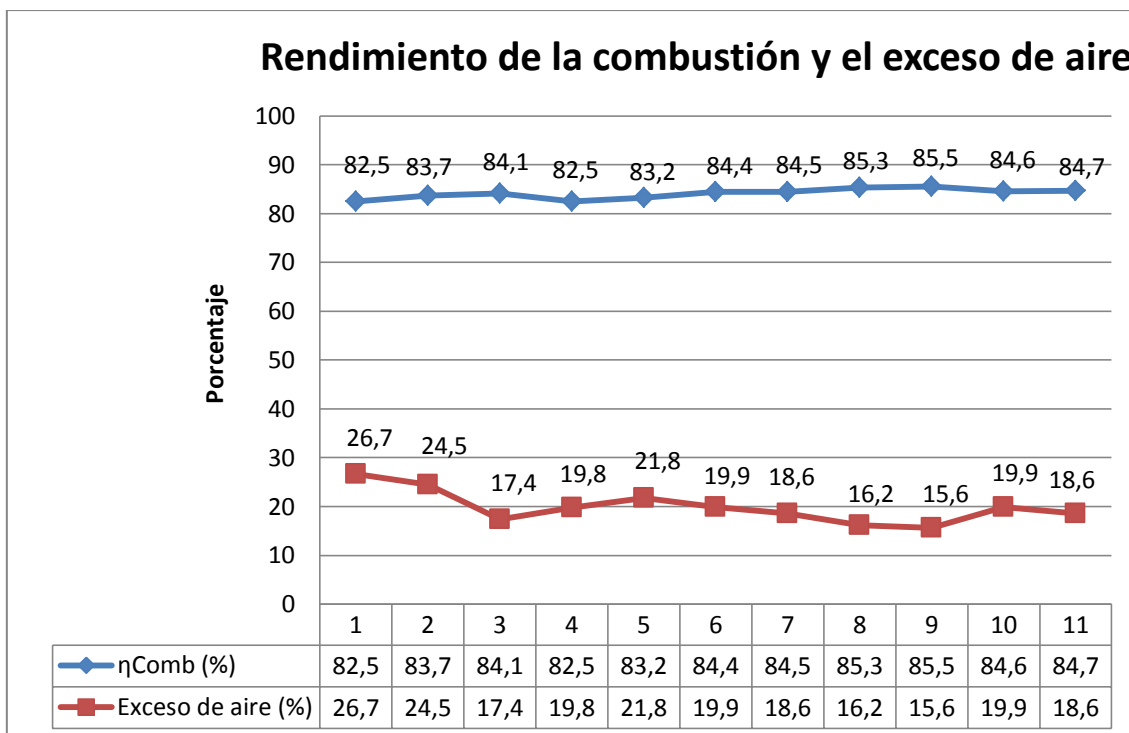


Figura 4.8 Comportamiento del rendimiento de la combustión en función del exceso de aire – Gas Tipo 2

Como se evidencia en la Figura 4.7 y 4.8, el exceso de aire es inversamente proporcional al rendimiento de la combustión.

4.5.2 Composición de los gases de combustión

La mayoría de las pérdidas de calor en una caldera se producen a través de la chimenea, si existe aire deficiente en las operaciones, la salida del combustible sin quemar sería evidente en el análisis de gases y cuando hay un exceso de aire el calor se pierde como oxígeno no utilizado y nitrógeno que están presentes en las descargas de los gases de combustión a la atmósfera.

Como el propósito de la optimización es mantener las pérdidas totales al mínimo, esto se consiguió reduciendo al mínimo el exceso de aire y reduciendo lo más posible las temperaturas de las emisiones en la chimenea.

Por lo tanto, en base al monitoreo, calibración y control de los parámetros de operación mediante la regulación de flujos de entrada de aire e ingreso de gas combustible y a diferentes cargas, se consiguió los siguientes resultados para el gas combustible Tipo 1:

Tabla 4.9 Valores de las emisiones atmosféricas después de la calibración-Gas Tipo 1

Fecha	Tgc °C	O ₂ %	CO ₂ %	CO ppm	NO _x ppm	SO ₂ ppm	Exc _{air} %	η _{Comb} %	Ta °C	Carga %
07/11/2015	172,2	4,0	9,47	1	38	0	21	84	32,3	10
07/11/2015	180,9	4,5	9,19	0	35	0	24,4	84,9	33,6	18
07/11/2015	191,2	4,7	9,08	0	35	0	25,8	84,5	34,0	26
07/11/2015	202,0	4,0	9,47	0	36	0	21	84,4	36,8	35
07/11/2015	218,5	4,1	9,41	0	37	0	21,7	83,8	37,8	43
07/11/2015	211,9	4,0	9,47	0	40	0	21	84	36,6	51
07/11/2015	216,6	4,6	9,13	0	39	0	25,1	83,6	34,0	59
07/11/2015	222,0	4,5	9,19	24	42	0	24,4	83,4	34,1	67
07/11/2015	227,0	4,6	9,13	26	42	0	25,1	83,1	32,6	75
07/11/2015	232,6	5,0	8,91	0	41	0	28	82,7	32,2	84
07/11/2015	231,7	4,7	9,08	6	43	0	25,8	82,9	32,6	90
Promedio:	209,7	4,4	9,2	5,2	38,9	0	23,9	83,8	34,2	

Tgc: Temperatura gases de combustión

η_{Comb}: Rendimiento de la combustión

Ta: Temperatura del aire al ambiente

Para el gas combustible Tipo 2, se puntualizan los valores en la Tabla 4.10 que se detalla a continuación:

Tabla 4.10 Valores de las emisiones atmosféricas después de la calibración-Gas Tipo 2

Fecha	Tgc °C	O ₂ %	CO ₂ %	CO ppm	NO _x ppm	SO ₂ ppm	Exc _{air} %	η _{Comb} %	Ta °C	Carga %
17/04/2016	148,5	4,8	6,79	5	17	0	26,7	82,5	25,4	10
17/04/2016	159,0	4,5	6,73	2	19	0	24,5	83,7	27,3	18
17/04/2016	168,1	3,4	7,57	1	22	0	17,4	84,1	29,7	26
17/04/2016	174,1	3,8	6,39	0	23	0	19,8	82,5	26,1	35
18/04/2016	198,5	4,1	7,52	0	36	0	21,8	83,2	34,0	43
18/04/2016	205,6	3,8	8,13	0	38	0	20,0	84,4	34,7	51
18/04/2016	214,1	3,6	8,18	0	36	0	18,6	84,5	38,4	59
18/04/2016	218,7	3,2	8,91	0	41	0	16,2	85,3	39,4	67
18/04/2016	221,8	3,1	9,02	0	41	0	15,6	85,5	40,3	75
18/04/2016	224,9	3,8	9,11	0	42	0	20,0	84,6	40,4	84
18/04/2016	226,2	3,6	9,15	0	43	0	18,6	84,7	40,5	90
Promedio:	196,3	3,8	7,95	0,73	32,5	0	19,9	84,1	34,2	

Tgc: Temperatura gases de combustión**η_{Comb}:** Rendimiento de la combustión**Ta:** Temperatura del aire al ambiente

Considerando las condiciones iniciales (antes de la calibración) y las condiciones finales (después de la calibración), los beneficios que se alcanzó para el ambiente con la graduación del sistema de operación de la caldera fueron las que se indican en la Tabla 4.11.

Tabla 4.11 Comparación de las condiciones ambientales

Parámetro	Condición inicial	Condición	Condición
		Final - Gas Tipo 1	Final - Gas Tipo 2
O ₂ (%)	12,5	4,4	3,8
CO ₂ (%)	6	9,2	7,95
CO (ppm)	1253	5,2	0,73
NO _x (ppm)	19	38,9	32,5
SO ₂ (ppm)	0	0	0

Como se aprecia en la Tabla 4.11, los porcentajes de dióxido de carbono (CO₂) y Óxidos Nitrosos (NO_x) son aceptables respecto a la normativa ambiental y no hay una variación significativa; en relación a la concentración de dióxido de azufre (SO₂) se mantiene y en lo que respecta al monóxido de carbono (CO) que es un componente peligroso en valores altos, se consiguió reducir considerablemente.

El nivel de emisiones que se logró, operando con el gas combustible Tipo 1, se esquematiza en la Figura 4.9.

Emisiones atmosféricas y rendimiento de la combustión - Gas combustible Tipo1

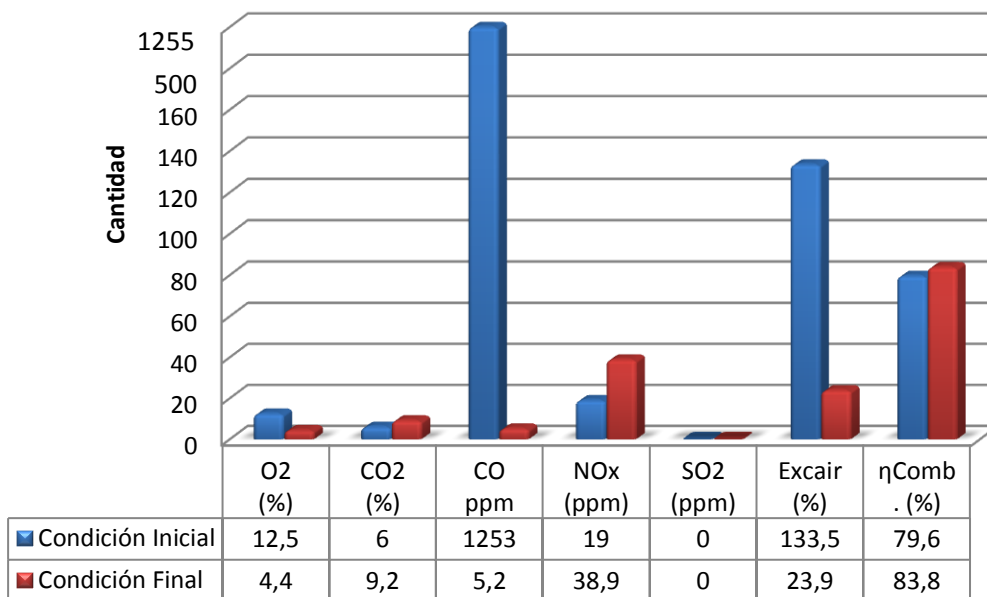


Figura 4.9 Comportamiento emisiones atmosféricas y rendimiento de la combustión- Gas Tipo 1

Así mismo se aprecia en la Figura 4.10, lo que se consiguió con operación del gas combustible Tipo 2, donde las emisiones a la atmósfera bajaron.

Emisiones atmosféricas y rendimiento de la combustión - Gas combustible Tipo2

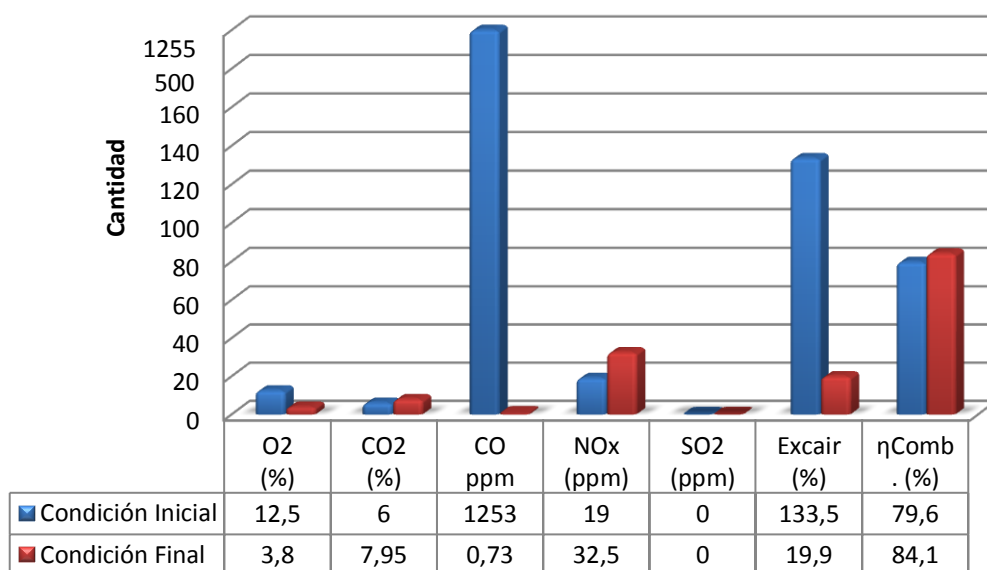


Figura 4.10 Comportamiento emisiones atmosféricas y rendimiento de la combustión- Gas Tipo 2

4.5.3 Rendimiento después de efectuado la calibración (Método Indirecto)

Una vez realizado la calibración de la caldera, se determinó el rendimiento mediante las ecuaciones indicadas en el Capítulo 2, donde se obtuvieron los siguientes resultados:

a) **Los valores y esquemas para el gas combustible Tipo 1.-** Se especifican en las tablas 4.12 y 4.13 que detallan a continuación:

Tabla 4.12 Valores de los adicionales de calor posterior a la calibración-Gas combustible Tipo 1

Parámetro	Valor	Unidad
Calor sensible en el aire de entrada C_1 (Ec. 2.12)	0,0021	kJ/kg
Calor sensible en el combustible C_2 (Ec. 2.13)	112,40	kJ/kg
Calor de entrada del agua C_3 (Ec. 2.14)	140,00	kJ/kg
Calor que entra con la humedad del aire C_4 (Ec. 2.15)	0.001	kJ/kg
TOTAL:	252,4	kJ/kg

Las pérdidas de energía del equipo en condiciones finales, con el gas combustible Tipo 1 son los que se muestran en la Tabla 4.13:

Tabla 4.13 Valores de las pérdidas de energía en la caldera posterior a la calibración-Gas combustible Tipo 1

Parámetro	Valor	Unidad
Pérdida de calor por gases secos de la combustión q_1 (Ec. 2.17)	2067,43	kJ/kg
Pérdida de calor debido al hidrógeno en el combustible q_2 (Ec. 2.18)	427,42	kJ/kg
Pérdida de calor debido a la humedad presente en el combustible q_3 (Ec. 2.19)	930,12	kJ/kg
Pérdida de calor debido a la humedad presente en el aire q_4 (Ec. 2.20)	268,95	kJ/kg
Pérdida de calor debido a la formación de monóxido de carbono (CO) q_5 (Ec. 2.21)	105,31	kJ/kg
Pérdidas de calor por radiación y convección q_6 (Ec. 2.30)	1430,83	kJ/kg
Pérdida de calor debido a las cenizas no quemadas q_7 (Ec. 2.31)	80,16	kJ/kg
Pérdida de calor debido a la cenizas en el fondo q_8 (Ec. 2.32)	260,15	kJ/kg
TOTAL:	5570,38	kJ/kg

La comparación de las pérdidas de energía en la caldera pirotubular, entre las condiciones iniciales (antes de la calibración) y las condiciones finales (después de la calibración), con el gas combustible Tipo 1 son las que se detallan en el siguiente esquema:

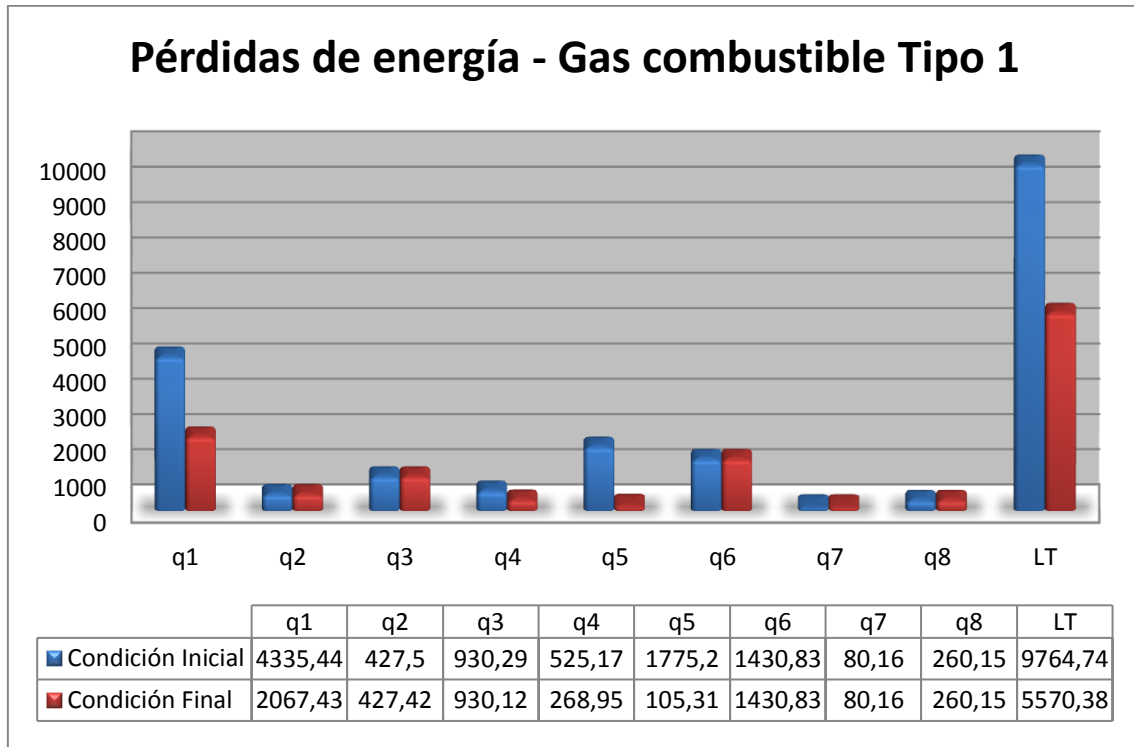


Figura 4.11 Comparación de las pérdidas de energía en la caldera-Gas Tipo 1

Por lo tanto, al estar operando la caldera con gas combustible Tipo 1, se consiguió el siguiente rendimiento:

$$\eta_{cal.} = 78,81 \% \quad (\text{Respuesta 4.1})$$

b) **Los valores y esquemas para el gas combustible Tipo 2.-** Se especifican en las tablas 4.14 y 4.15 que detallan a continuación:

Tabla 4.14 Valores de los adicionales de calor posterior a la calibración-Gas combustible Tipo 2

Parámetro	Valor	Unidad
Calor sensible en el aire de entrada C_1 (Ec. 2.12)	20,07	kJ/kg
Calor sensible en el combustible C_2 (Ec. 2.13)	112,40	kJ/kg
Calor de entrada del agua C_3 (Ec. 2.14)	140,00	kJ/kg
Calor que entra con la humedad del aire C_4 (Ec. 2.15)	6,90	kJ/kg
TOTAL:	279,37	kJ/kg

Las pérdidas de energía del equipo en condiciones finales, con el gas combustible Tipo 2 son los que se muestran en la Tabla 4.15:

Tabla 4.15 Valores de pérdidas de energía en la caldera posterior a la calibración- Gas combustible Tipo 2

Parámetro	Valor	Unidad
Pérdida de calor por gases secos de la combustión q_1 (Ec. 2.17)	1594,61	kJ/kg
Pérdida de calor debido al hidrógeno en el combustible q_2 (Ec. 2.18)	278,96	kJ/kg
Pérdida de calor debido a la humedad presente en el combustible q_3 (Ec. 2.19)	918,69	kJ/kg
Pérdida de calor debido a la humedad presente en el aire q_4 (Ec. 2.20)	201,06	kJ/kg
Pérdida de calor debido a la formación de monóxido de carbono (CO) q_5 (Ec. 2.21)	17,16	kJ/kg
Pérdidas de calor por radiación y convección q_6 (Ec. 2.30)	1431,29	kJ/kg
Pérdida de calor debido a las cenizas no quemadas q_7 (Ec. 2.31)	80,16	kJ/kg
Pérdida de calor debido a la cenizas en el fondo q_8 (Ec. 2.32)	260,15	kJ/kg
TOTAL:	4782,08	kJ/kg

La comparación de las pérdidas de energía en la caldera pirotubular, entre las condiciones iniciales (antes de la calibración) y las condiciones finales (después de la calibración) con el gas combustible Tipo 2, son las que se detallan en el siguiente esquema:

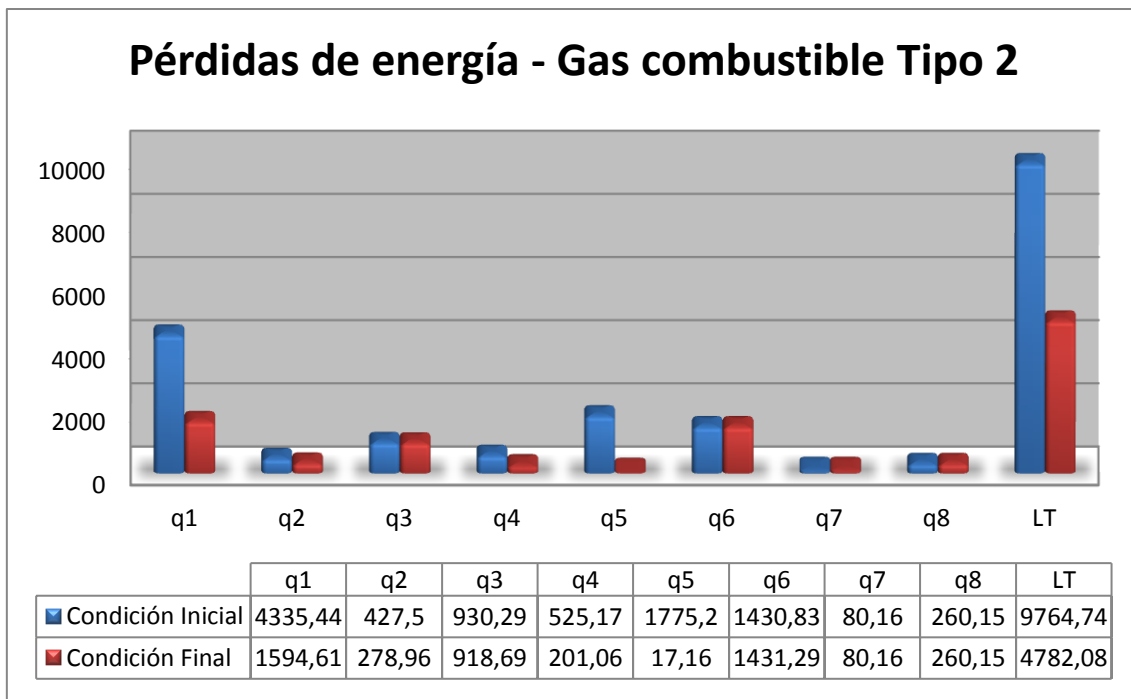


Figura 4.12 Comparación de las pérdidas de energía en la caldera-Gas Tipo 2

Por lo tanto, considerando las características del gas combustible Tipo 2, se consiguió mediante ecuaciones, el siguiente rendimiento de la caldera:

$$\eta_{cal.} = 77,35 \% \quad (\text{Respuesta 4.2})$$

Como se evidencia, existe un incremento en el rendimiento de la caldera, mediante el control de las emisiones por la chimenea, en el que se logró incrementar un 8,32 %. Lo conseguido fue mediante el control de ingreso de aire, gas combustible y el monitoreo con el analizador portátil de gases de marca Testo.

4.5.4 Interpretación de pérdidas en la caldera mediante un esquema

En base al esquema que se muestra más adelante (Figura 4.13), se puede apreciar las diversas pérdidas que se pueden generar en la caldera en función del exceso o deficiencia de aire.

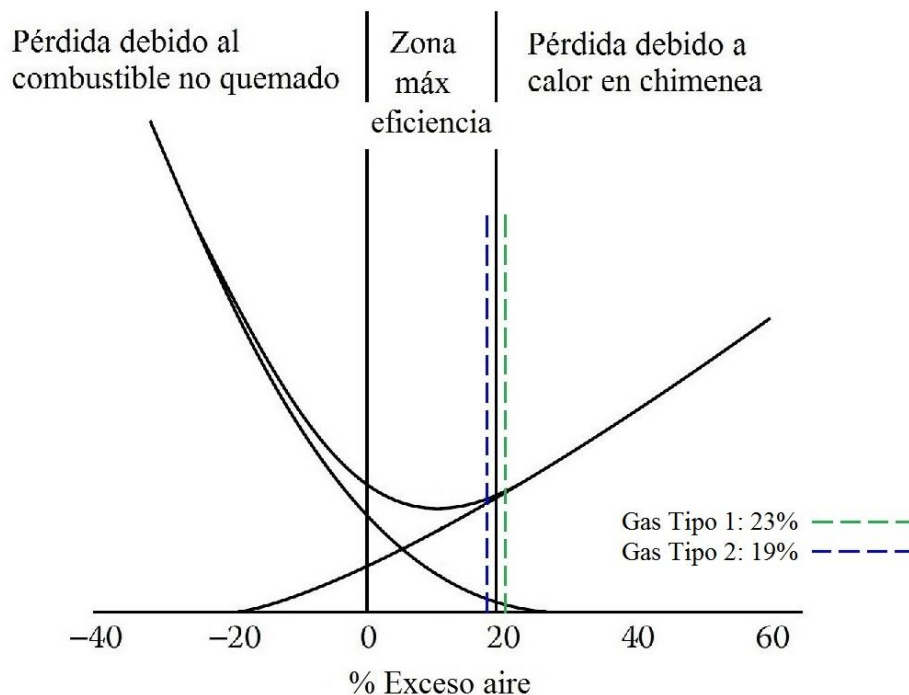


Figura 4.13 Las pérdidas de la caldera en función del exceso de aire

Fuente: Process Control and Optimization, 2006

En toda caldera existe un punto de equilibrio con el cual se consigue una mayor eficiencia térmica de la caldera, es así que con una relación adecuada aire-combustible, las pérdidas son bajas y tiende el equipo a tener un funcionamiento óptimo. Precisamente conforme aumenta el exceso de aire, las pérdidas por gases producto de la combustión que sale por la chimenea se incrementan, en la Figura 4.13 se aprecia lo que se consiguió con el gas Tipo 1 y 2 que son 23 % y 19%.

El exceso de oxígeno (O₂) como la base de la optimización de la caldera es una medida relativamente sensible, es por eso que se utiliza sondas de óxido de circonio, con el fin de minimizar los efectos de fuga del conducto, la sonda debe instalarse cerca de la zona de combustión.

En la Figura 4.14 se ilustra los diferentes tipos de combustibles y el exceso de oxígeno necesario para la combustión, en donde para la caldera YB701C el requerimiento de exceso de oxígeno (O₂) en el gas es menor en comparación con los demás combustibles (Diésel y Carbón), con el objeto de efectuar una combustión completa. En el Tabla 4.15 se muestra los porcentajes usuales de exceso de aire, dependiendo del tipo de combustible.

Por lo tanto, al utilizar como combustible al gas, se requiere de aproximadamente 1,5 % de exceso de oxígeno para que el equipo trabaje con el 100 % (cien por ciento) de la carga, mientras que para cargas inferiores al 50%, se necesitará una mayor cantidad exceso de oxígeno.

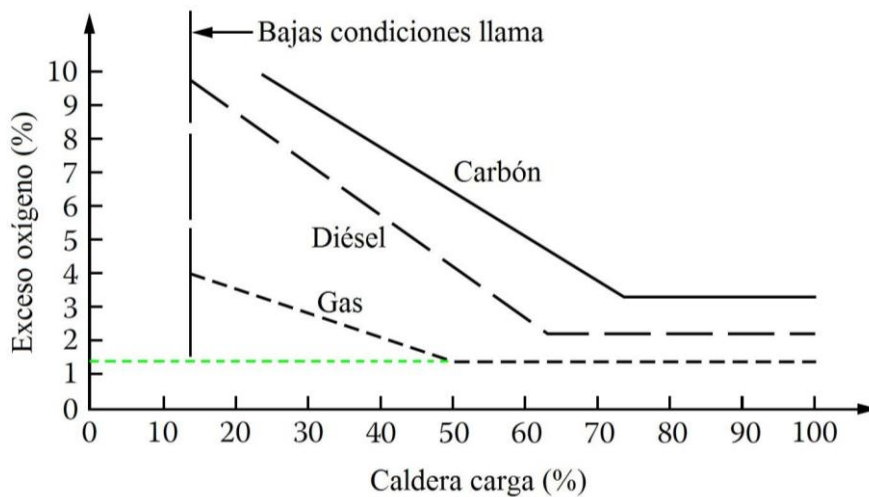


Figura 4.14 Exceso de oxígeno en función de la carga y tipo combustible

Fuente: Process Control and Optimization, 2006

4.5.5 Ahorro energético

El porcentaje de ahorro de combustible (Taplin, 2015) se determina en base al rendimiento anterior y el nuevo rendimiento que se incrementó, la ecuación es la siguiente:

$$S = \frac{\eta_{\text{nuevo}} - \eta_{\text{anterior}}}{\eta_{\text{nuevo}}} \quad (\text{Ecuación 4.1})$$

Por lo tanto el ahorro de combustible es del 10,24 %.

Para el ahorro eficiente de combustible durante el año, se determina mediante la siguiente fórmula:

$$S = \frac{\eta_{\text{nuevo}} - \eta_{\text{anterior}}}{\eta_{\text{nuevo}}} \cdot Q_C \cdot \text{PCN} \cdot H_{\text{año}} \cdot C_{\text{Comb}} \quad (\text{Ecuación 4.2})$$

Siendo:

S: Ahorro potencial por año

η_{nueva} : Rendimiento nuevo (%)

η_{anterior} : Rendimiento anterior (%)

Q_C : Cantidad de uso combustible (kg/h)

PCN: Poder calorífico neto (kJ/kg)

C_{Comb} : Costo de combustible (\$/kJ) [Anexo 13]

$H_{\text{año}}$: Tiempo de operación en horas por año (h)

Por lo tanto aplicando la ecuación 4.2, se tiene un ahorro anual de **\$ 11 915,16** dólares de los Estados Unidos de América

4.5.5.1 Ahorro energético mediante esquemas

El potencial ahorro de combustible de la caldera YB701C, resultante de la reducción del exceso de oxígeno (O₂), se puede estimar también a partir de gráficos tales como los que se muestran en las Figuras 4.15 y 4.16.

La información que se consideró para realizar los esquemas, son los que se detallan en la Tabla 4.16.

Tabla 4.16 Datos para determinar potencial ahorro de combustible

	Oxígeno en los gases combustión (%)	Temperatura gases combustión (° C)	Temperatura neta ($T_{gc} - T_a$) (° C)
Sin Optimizar	12,5	209,9	180,6
Optimizado-Gas Tipo 1	4,4	209,7	175,5
Optimizado-Gas Tipo 2	3,8	196,3	162,1

La temperatura neta es la diferencia entre la temperatura de los gases producto de la combustión y la temperatura ambiente; la temperatura de los gases producto de la combustión son los obtenidos en él toma muestras de la chimenea.

Como se aprecia en la Tabla 4.16, los valores de la temperatura de los gases producto de la combustión son inferiores cuando se logra optimizar, es así que con el gas combustible Tipo 1 y 2 se consiguió disminuir en 0,2 °C y 13,6 °C respectivamente; una

temperatura superior a los 230 °C significa que toca efectuar una limpieza interna. Además no debe bajar demasiado la temperatura de los gases producto de combustión, más allá de la temperatura del punto de rocío, ya que provocaría condensados en el vapor generado.

Trazando los valores en la Figura 4.15 se deduce que:

- ✓ El potencial ahorro de gas combustible Tipo 1 es de: **8 %**, que es la diferencia entre valor sin optimizar y valor optimizado (9 % - 1 % = 8 %).
- ✓ El potencial ahorro de gas combustible Tipo 2 es de: **8,5 %**, que es la diferencia entre valor sin optimizar y valor optimizado (9 % - 0,5 % = 8 %).

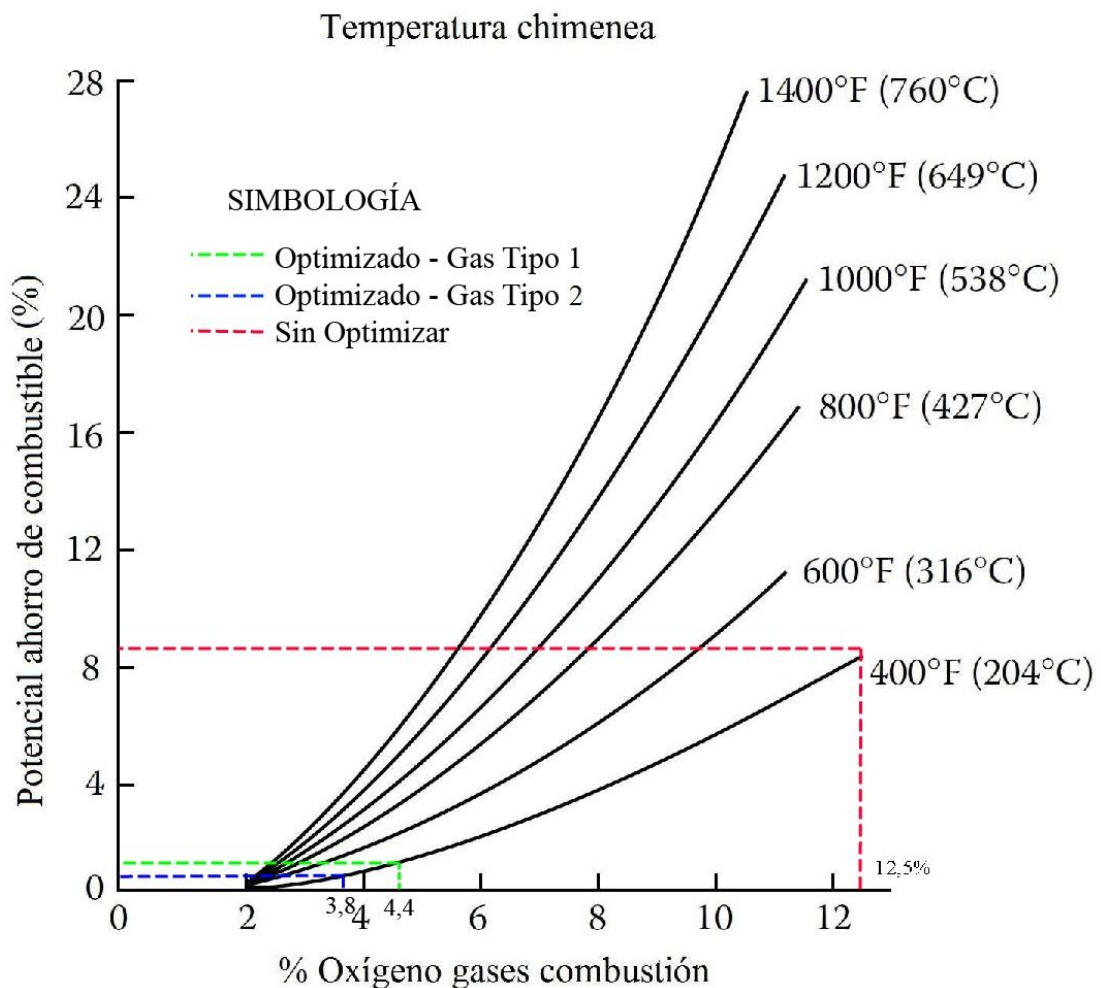


Figura 4.15 Potencial ahorro de combustible

Fuente: Process Control and Optimization, 2006

Al efectuar la proyección en la Figura 4.16, se tiene como resultado lo siguiente:

- ✓ El potencial ahorro de gas combustible Tipo 1 que se obtuvo es de: **7,7 %** (15,7 % - 8 %).

- ✓ El potencial ahorro de gas combustible Tipo 2 que se consiguió es de: **8 %** (15,7 % - 7,7 %).

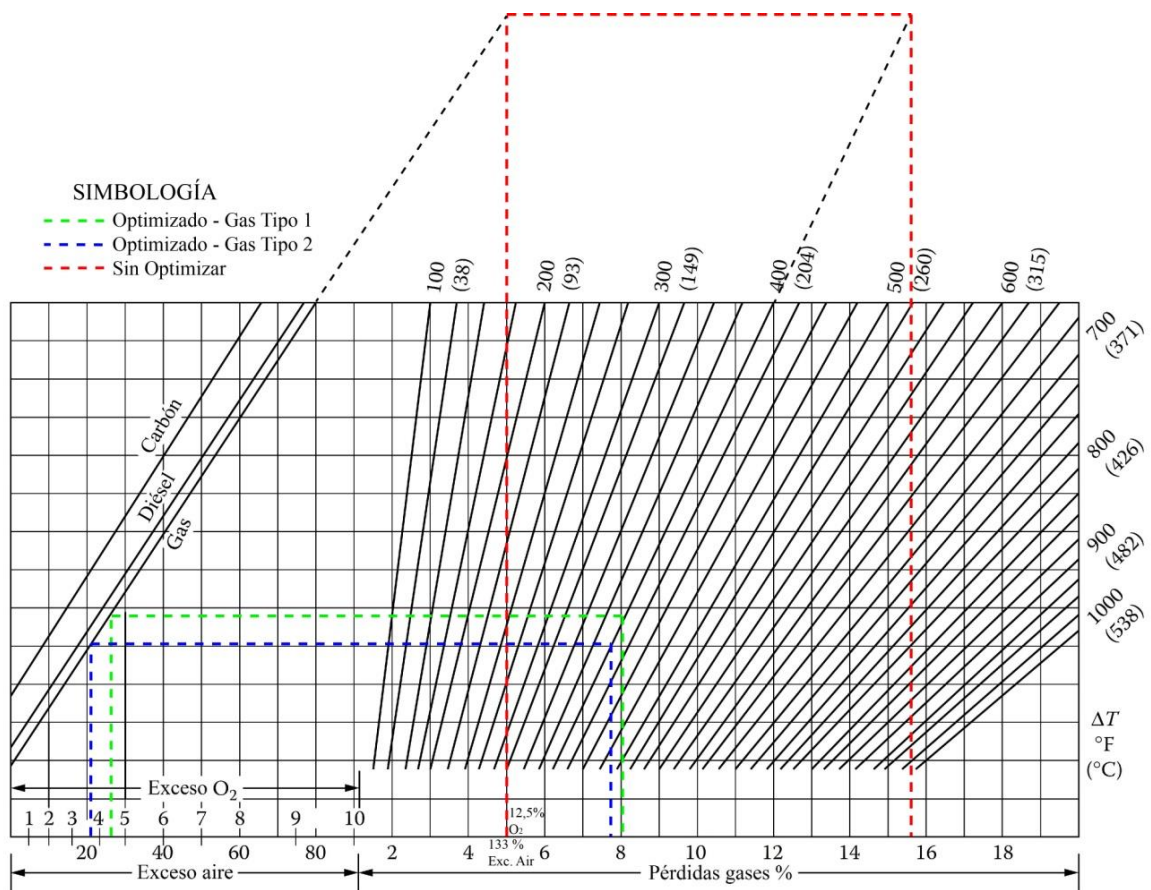


Figura 4.16 Ahorro potencia de combustible

Fuente: Process Control and Optimization, 2006

4.5.6 Análisis de la combustión del quemador mediante el método de elementos finitos (MEF) en condiciones finales

Para la simulación en condiciones finales (después de la calibración) se establecieron mediante cálculos, los flujos de combustible y de aire que se detallan a continuación:

Tabla 4.17 Condiciones de flujos de gas combustible y aire finales

Descripción	Valor	Unidad
Flujo de combustible principal de cada inyector (Q_{Cpri})	0,00097356	kg/s
Flujo de combustible secundario de cada inyector (Q_{Csec})	0,00097356	kg/s
Flujo de aire primario ($Q_{Air-pri}$)	0,8674	kg/s
Flujo de aire secundario ($Q_{Air-sec}$)	0,2065	kg/s

Los resultados de la simulación en condiciones finales (después de efectuado la calibración) son las figuras que se muestran:

En la Figura 4.17 se aprecia el entorno de la magnitud velocidad de la combustión.

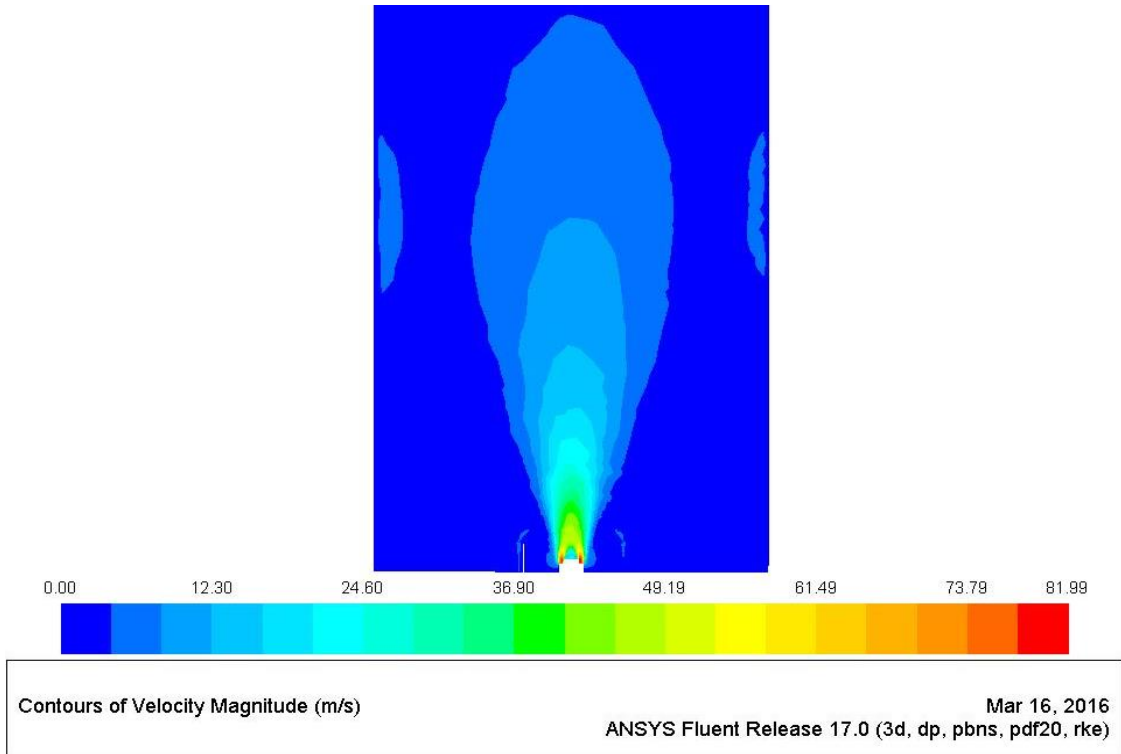


Figura 4.17 Contorno velocidad de la combustión

En la figura 4.18 se aprecia el entorno del número de Reynolds de la combustión.

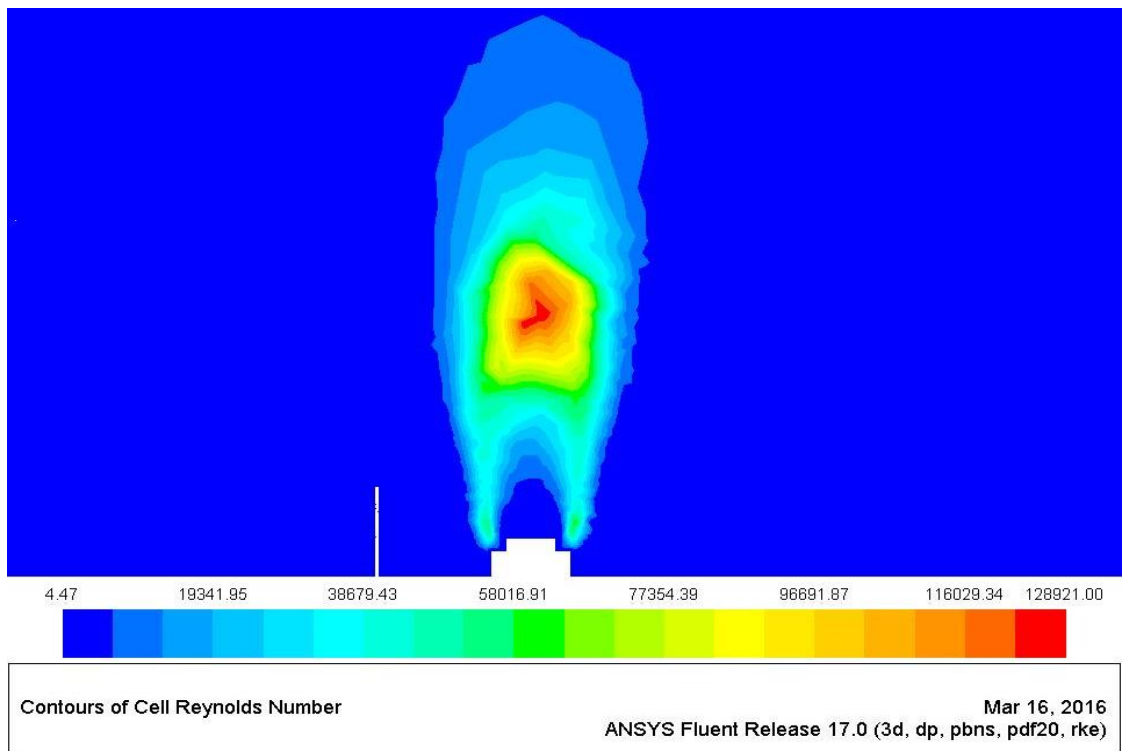


Figura 4.18 Entorno del número de Reynolds

La temperatura estática en el hogar o cámara de combustión Figura 4.19.

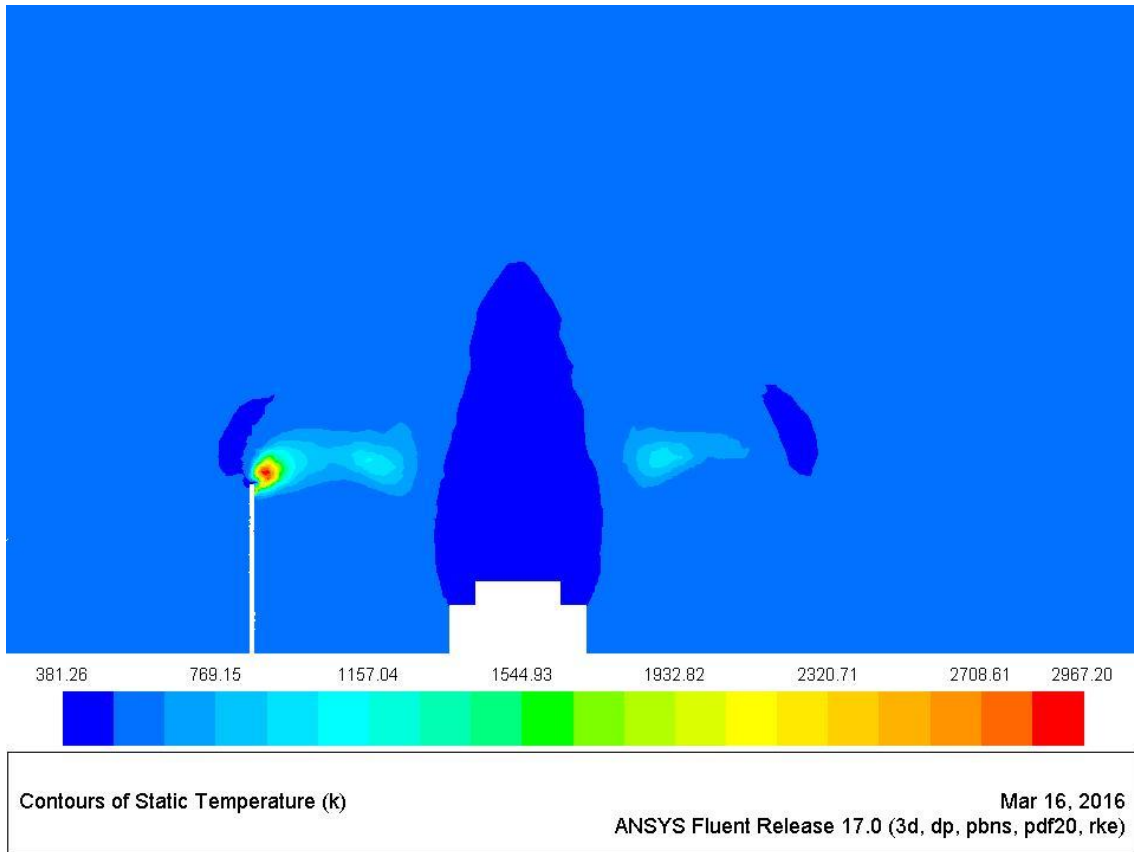


Figura 4.19 Contorno de la temperatura estática en el hogar

El entorno de la viscosidad turbulenta de la combustión en el hogar (Figura 4.20).

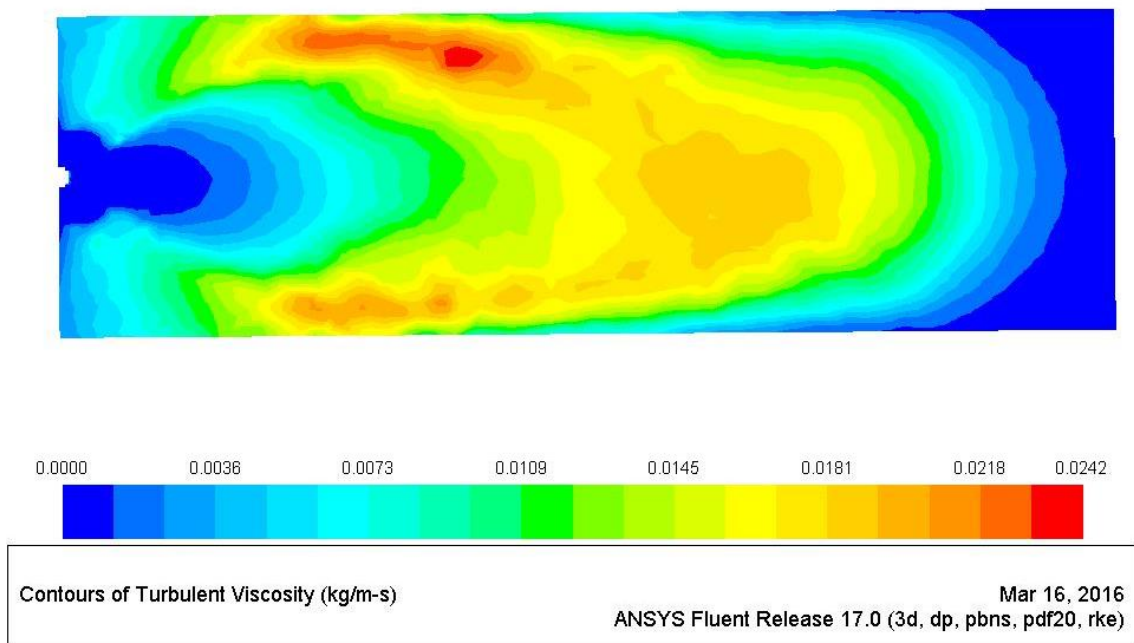


Figura 4.20 Contorno de la viscosidad turbulenta

Se aprecia el entorno de la conductividad térmica efectiva en el hogar (Figura 4.21).

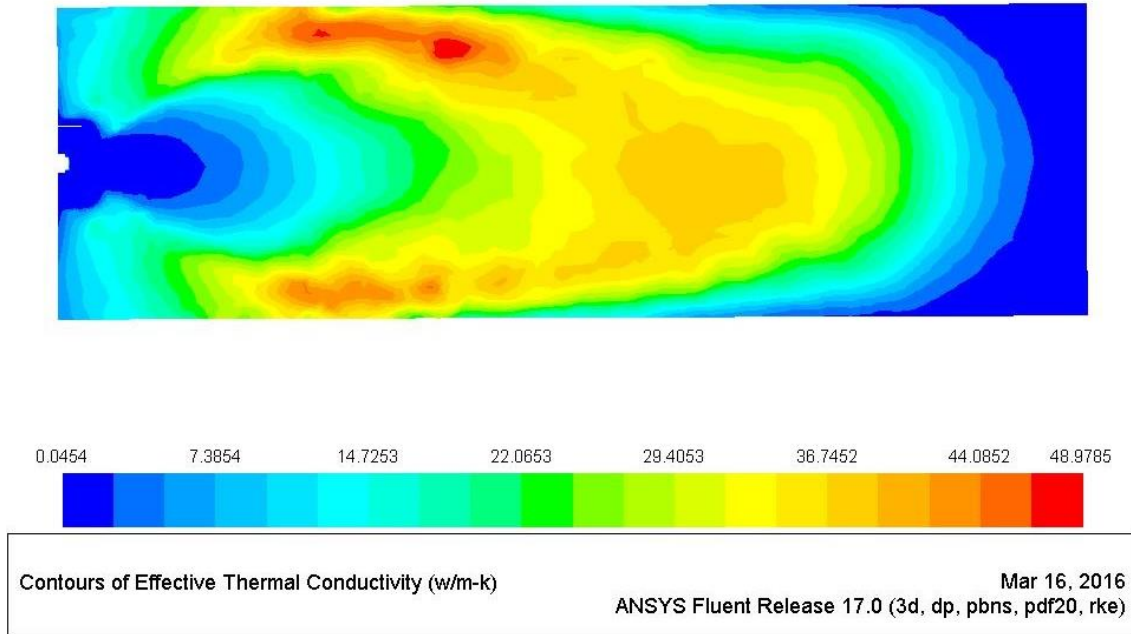


Figura 4.21 Contorno de la conductividad térmica efectiva

Se muestra el desequilibrio de la masa dentro del hogar de la caldera, que es la mezcla no efectuada en la combustión (Figura 4.22).

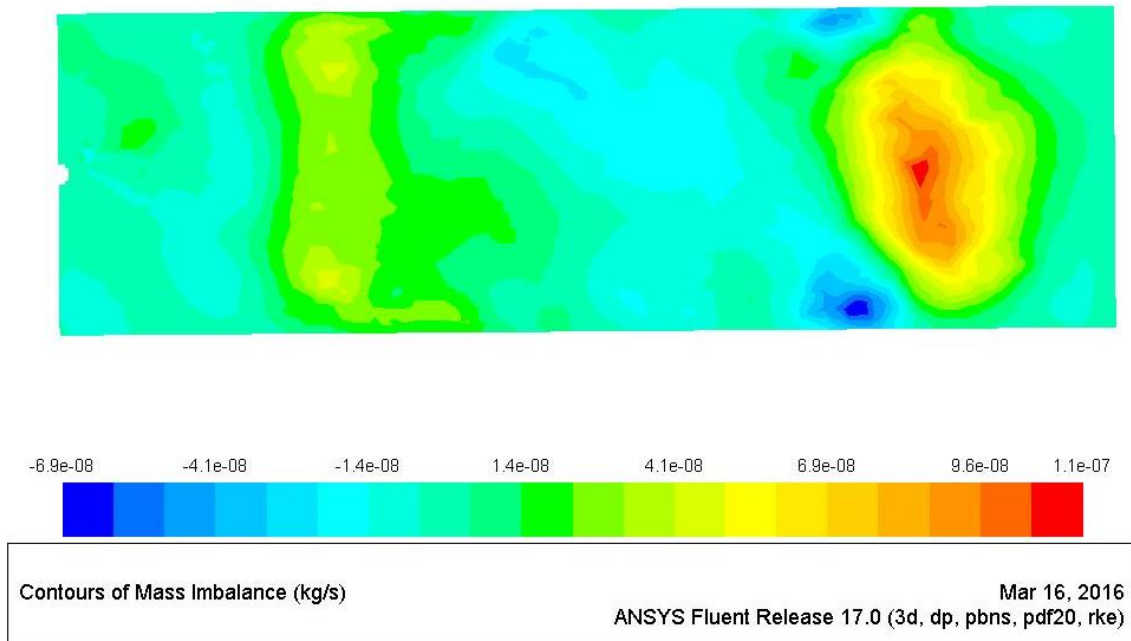


Figura 4.22 Contorno de desequilibrio de la masa

Se detalla a continuación en la Tabla 4.18, una síntesis de los resultados obtenidos de la simulación en condiciones finales (después de la calibración) del gas combustible Tipo 1, los valores son los siguientes:

Tabla 4.18 Resumen de la simulación en condiciones finales

Medida	Valor	Valor	Unidad
	Mínimo	Máximo	
Velocidad de la flama	0	81,99	m/s
Número de Reynolds	4,47	128921	
Temperatura estática	382,26	2967,2	K
Viscosidad Turbulenta	0	0,0242	kg/m's
Conductividad térmica efectiva	0,0454	48,97	W/m·K
Masa no balanceada	-6,90x10 ⁸	1,10x10 ⁷	kg/s

En la Tabla 4.19 se esquematiza la comparación entre las condiciones iniciales (antes de la calibración) y las condiciones finales (después de la calibración).

Como se observa, en condiciones finales se tiene una mejor conductividad térmica efectiva y una mejor mezcla entre gas combustible y aire, en comparación con los valores de las condiciones iniciales.

Tabla 4.19 Comparación de los resultados de la simulación

Medida	Condiciones iniciales	Condiciones finales	Unidad
Velocidad de la flama	157,4	81,99	m/s
Número de Reynolds	143118	128921	
Temperatura estática	507.71	2967,2	K
Viscosidad Turbulenta	0,0426	0,0242	kg/m's
Conductividad térmica efectiva	28,10	48,97	W/m·K
Masa no balanceada	2,30x10 ⁷	1,10x10 ⁷	kg/s

4.5.7 Análisis financiero

En esta sección se determinó la factibilidad del proyecto, mediante aplicación de las técnicas del TIR (Tasa Interna de Retorno) y el VAN (Valor Actual Neto).

Para efectuar el análisis financiero se procedió de la siguiente manera:

4.5.7.1 Cálculo de capital para la innovación

Para la determinación del capital necesario que se requiere para la innovación tecnológica, se lo efectuó de la siguiente manera:

1. Costos de investigación

2. Costos de adquisición del equipo
3. Costos de operación y mantenimiento

1. Costos de investigación

A continuación se muestra en la siguiente tabla, el presupuesto de la investigación:

Tabla 4.20 Valores para la investigación

A. EQUIPOS	Número de unidades	Costo Hora (USD.)	Total Horas	Costo Total (USD.)
Computador	1	1,2	350	420,00
Analizador de gases	1	12	35	250,00
Cámara termográfica	1	12	5	60,00
Pinza amperimétrica	1	8	3	24,00
Multímetro	1	8	3	24,00
Sicrómetro.	1	10	2	20,00
Cromatógrafo	1	50	1	50,00
Analizador de agua	1	10	3	30,00
TOTAL A:¹				878,00
B. MANO DE OBRA	Número de personas	Costo hora	Horas Trabajadas	Costo Total
Mano de obra personal	1	2,29	402	920,58
TOTAL B:²				920,58
C. MATERIALES	Cant.	Unidad	Costo Unitario	Costo Total
Material de escritorio	1	Glb.	80	80,00
Material bibliográfico	1	Glb.	150	150,00
Copias	1	Glb.	50	50,00
TOTAL C:				280,00
D. TRANSPORTE			TOTAL D:	250,00
E. COSTOS INDIRECTOS 22%		(A+B+C+D)*22%	TOTAL E:	512,29
COSTO TOTAL (A+B+C+D+E):				\$ 2840,87

2. Costos de adquisición del equipo

Los costos de adquisición del equipo analizador de gases en línea con lo que se conseguirá optimizar la operación y simplificar el proceso de desarrollo de la generación de vapor de la caldera YB701C, está en base a una cotización proporcionada por una empresa especialista en calderas (Anexo 14).

Tabla 4.21 Valores para la adquisición del equipo

Detalle	Valores (USD.)
Costos de adquisición de equipos:	31796,80
Costos de transporte, montaje e instalación:	2500,00
Total:	34296,80

3. Costos de operación, mantenimiento y calibración del equipo analizador

Los costos de operación, mantenimiento y calibración del analizador de gases en línea de la caldera, se consideró la mano de obra del operador y del técnico de mantenimiento, así mismo se establece anualmente el valor para la calibración del analizador Honeywell (Tabla 4.22).

Tabla 4.22 Valores para la operación, mantenimiento y calibración

Detalle	Valores en USD.
Costos de operación y mantenimiento (anual)	545,32
Costos de calibración (anual)	1500,00
Total:	2045,32

4.5.7.2 Cálculo del TIR y VAN del proyecto de inversión

A continuación se realizará el cálculo del TIR y VAN (Tabla 4.23) del proyecto de inversión, teniendo como ahorro de combustible \$11 433,16.

Tabla 4.23 Valores del TIR y VAN

AÑO	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Costo de Inversión	37137,67										
Costos de operación y mantenimiento		2045,32	2045,32	2045,32	2045,32	2045,32	2045,32	2045,32	2045,32	2045,32	2045,32
Total de Gastos	37137,67	2045,32	2045,32	2045,32	2045,32	2045,32	2045,32	2045,32	2045,32	2045,32	2045,32
Ahorro de combustible		11433,16	11433,16	11433,16	11433,2	11433,2	11433,2	11433,2	11433,2	11433,2	11433,2
Total de Ingresos:		11433,16	11433,16	11433,16	11433,2	11433,2	11433,2	11433,2	11433,2	11433,2	11433,2
Flujo de caja:	-37137,67	9387,84	9387,84	9387,84	9387,84	9387,84	9387,84	9387,84	9387,84	9387,84	9387,84
Flujo acumulado:	-27749,83	-18361,99	-8974,15	413,69	9801,53	19189,37	28577,21	37965,05	47352,89	56740,73	
Tasa de descuento	8%										
Valor Actual Neto (VAN) de la inversión:	\$ 62.993,17										
Interés del Banco Central del Ecuador	10,21%										
Tasa Interna de Rendimiento financiero (TIR) de la inversión:	22%										
Periodo de recuperación:	4 Años										

El valor del VAN (valor actual neto) que se consiguió fue de \$62993,17 y un 22 % del valor del TIR que es superior al interés del Banco Central del Ecuador, por lo que el proyecto resulta rentable.

Por lo tanto, el tiempo de recuperación de la inversión es de 4,0 años.

4.5.8 Equipo analizador Honeywell modelo Slate

El proceso actualmente dispone de un controlador de marca Siemens LV51, entre las ventajas que tiene el equipo propuesto de marca Honeywell modelo Slate y el instalado de marca Siemens modelo LV51 son:

- ✓ Elimina el cableado y la programación compleja.
- ✓ El ajuste del oxígeno (O₂) más eficaz y la incorporación de dos controles VFD en el módulo de control de relación de combustible y aire garantiza una precisión excepcional y optimiza el rendimiento del quemador.
- ✓ Tiene 24 puntos por cada curva; 12 puntos más que el equipo Siemens.
- ✓ Aplicaciones donde se requieren límites de baja o alta temperatura.
- ✓ Un amplio rango de torques disponibles para actuadores, desde 5,65 N.m (50 lb.plg) hasta 101,7 N.m (900 lb.plg).
- ✓ Los módulos individuales se pueden retirar y reemplazar fácilmente sin necesidad de reprogramar la plataforma.
- ✓ Control del nivel, temperatura y presión de agua, aire o gas combustible.
- ✓ El visualizador de pantalla táctil en el que se puede programar y controlar la caldera.
- ✓ Puede operar de 24 VDC o 24 VAC hasta 240 VAC.



Figura 4.23 Analizador Honeywell

Fuente: <https://customer.honeywell.com>

4.5.9 Plan de monitoreo de emisiones

El procedimiento a seguir es el de establecer un plan de monitoreo de gases de combustión, mensualmente, con el analizador portátil de gases de marca Testo, donde

los resultados serán verificados con el analizador en línea de marca Honeywell modelo Slate, la finalidad es que la operación de la caldera este dentro de parámetros apropiados de funcionamiento y poder evitar pérdidas en lo menos posible, así mismo permanecer debajo de los niveles críticos de las emisiones al ambiente.

Para estos fines se tiene los periodos de funcionamiento de las calderas (determinado por el área de planificación), los tiempos planificados para la calibración del analizador (propuesta) y los ciclos mensuales de la inspección de las emisiones por el conducto de humos de las calderas con el analizador Testo.

Tabla 4.24 Plan de monitoreo y calibración de las calderas

PLAN DE OPERACIÓN, CONTROL DE EMISIONES Y CALIBRACIÓN ANALIZADOR

Descripción	Enero				Febrero				Marzo				Abril				Mayo				Junio				Julio				Agosto				Septiembre				Octubre				Noviembre				Diciembre							
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4				
Op. YB701A	■	■	■	■					■	■	■	■					■	■	■	■					■	■	■	■					■	■	■	■					■	■	■	■					■	■	■	■
Op. YB701B	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■				
Op. YB701C					■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■				
Co. YB701A	■								■								■								■								■								■											
Co. YB701B	■												■												■								■								■											
Co. YB701C					■												■												■								■															
Calb. YB701A					■	■																																														
Calb. YB701B																	■	■																																		
Calb. YB701C																																									■	■										

Nomenclatura:
 Op.: Operación del equipo
 Co.: Control de emisiones
 Calb.: Calibración del Analizador

4.6 Conclusiones del capítulo

- ✓ Con la calibración efectuada y operando con el Gas combustible Tipo 1, se determina que el rendimiento de la caldera conseguida fue de 78,81 %.
- ✓ Con la calibración efectuada y operando con el Gas combustible Tipo 2, se determina que el rendimiento de la caldera obtenida fue de 77.35 %.
- ✓ Así mismo el rendimiento de la combustión aumento en comparación con el rendimiento del mismo en las condiciones iniciales (antes de la calibración).

CONCLUSIONES

- ✓ Con el gas combustible tipo 1 que ingresa al quemador de caldera YB701C, se consigue incrementar el rendimiento de la caldera y de la combustión en 8,42 % (78,81 % – 70,39 %) y 4,2 % (83,8 % – 79,6 %) respectivamente.
- ✓ Con el gas combustible tipo 2 que ingresa al quemador de caldera YB701C, se consigue incrementar el rendimiento de la caldera y de la combustión en 6,96 % (77,35 % – 70,39 %) y 4,5 % (84,1 % – 79,6 %) respectivamente.
- ✓ Con el mejoramiento del rendimiento de la combustión, se logra un ahorro de \$ 11 915,16 (dólares de los Estados Unidos de América) anualmente, sin embargo a pesar de ser un valor bajo de acuerdo a la dimensión de la empresa, estos procedimientos se pueden adaptar a las demás calderas (dos) y hornos (siete) de las refinerías y de la planta de gas, con lo cual se conseguiría un ahorro significativo.
- ✓ Analizando la Figura 4.3, se observó que al estar operando el equipo hasta una carga del 84 % (108,2 kg/h) se consigue un menor consumo de combustible en comparación al 90 % (152,7 kg/h) de generación de vapor
- ✓ Mediante el software ANSYS y con la ayuda de cálculos se determinó que la combustión es más completa en condiciones finales (después de la calibración) donde la masa no balanceada mínima y máxima fueron $-6,90E+08$ kg/s y $1,10E+07$ kg/s respectivamente en comparación con las condiciones iniciales (antes de la calibración) en que la masa no balanceada mínima y máxima fueron $-1,40E+07$ kg/s y $2,30E+07$ kg/s respectivamente.
- ✓ En la simulación se apreció que en las condiciones iniciales había más flujo de aire, la temperatura era más baja en la cámara de la caldera, el número de Reynolds fue más alto y la masa desequilibrada era mayor en comparación con las condiciones finales que es cuando se realizó la calibración y por lo tanto la mejora es notable en la combustión.
- ✓ Con respecto a la parte ambiental, al comparar las condiciones iniciales y las finales (Tabla 4.6), los porcentajes de dióxido de carbono (CO_2) y Óxidos Nitrosos (NO_x) son aceptables y no hay una variación significativa, en relación a la concentración de dióxido de azufre (SO_2) tienen un valor de cero para ambos casos y en lo que respecta al monóxido de carbono (CO) que es un componente muy peligroso para el

medio ambiente como para las personas, se consiguió reducir considerablemente en 1247 ppm.

- ✓ Al analizar la curva de aire y gas combustible a diferentes cargas en condiciones iniciales (antes de la calibración), se evidenció que ha estado configurado para un tipo de gas combustible diferente al de las características del gas que se empleó para realización de la calibración, ya que al graduar los parámetros de operación estos se modificaban.
- ✓ Se logró conseguir un 22 % del valor del TIR en comparación del 10,21 % que indica el Banco Central del Ecuador y \$ 62993,17 USD. del VAN, por lo que el proyecto de invertir en un equipo analizador de gases en línea de la marca Honeywell modelo Slate es factible económicamente y el periodo de recuperación de la inversión es de 4,4 años. El sistema sugerido es de mucha mayor versatilidad que el equipo actualmente existente, pues permitirá un mejor control del rendimiento de la caldera.

RECOMENDACIONES

- ✓ La presente investigación se enfocó al estudio del mejoramiento del rendimiento de la combustión de la caldera YB701C, la cual puede ser replicado a las demás calderas y hornos de refinería y planta de gas.
- ✓ Se debería realizar la cromatografía trimestralmente, ya que gas combustible que se emplea para calderas y hornos puede variar las características repentinamente, ya que al haber cambios significativos en la composición del gas combustible se debería verificar las condiciones de los parámetros de operación del equipo, para lograr aprovechar de la mejor manera el mismo.
- ✓ Efectuar un análisis de las trampas de vapor, previo al mantenimiento general de las plantas, para ejecutar el reemplazo o mantenimiento de las mismas.
- ✓ La recuperación de condensados de las trampas de vapor de las dos refinerías deberían ser tomadas en cuenta para un estudio, ya que se podrían conseguir resultados alentadores en cuanto a la disminución de los costos operativos.

Referencias Bibliográficas

- ASME B31.1 (2012). Power piping. Desing. New York, N.Y.
- ASME VIII. Division 1. (2010) Boiler and Pressure Vessel Code
- ASME PTC 4.1 (1999). Steam Generating Units. Efficiency by input-output method and Efficiency by heat loss method. New York, N.Y.
- Cengel, Y., y Boles, M. (2011). Termodinámica (7a ed.). México: The McGraw Hill Companies
- Cengel, Y., (2007). Transferencia de calor y masa (3a ed.). México: The McGraw Hill Companies
- Domínguez, J., Cid, S., Uceda, J., Garrido, P., Lahoz, J., Almeida, J. (2012). Guía Básica de Calderas Industriales Eficientes Madrid: Graficas Arias Montano S.A.
- Esquerra, P. (1988). Dispositivos y sistemas para el ahorro energía Barcelona: Marcombo S.A.
- Gaffert, G. (1981). Centrales de vapor. Barcelona: Reverte
- Ganapathy, V. (2015). Steam Generators and Waste Heat Boilers. Florida: Taylor & Francis Group.
- Hernández, E. (2006). Manual de Estadística. Medellín: Teoría del color
- Lipták, B., Dukelow, S., Cheng, X., Meeker, R. (2006). Process Control and Optimization (4a ed.). Estados Unidos: CRC Pres.
- Límites máximos permisibles de emisión en hidrocarburos. Acuerdo Ministerial 91, Registro oficial 430 del 4 de enero de 2007. Ministerio de Energía y Minas. Quito
- Margarida, M. (1983). Aislamiento térmico. Barcelona: Industria gráfica Gersa.
- Jutglar L., Miranda, A., Villarrubia, M. (2011) Manual de calefacción. Barcelona: ediciones técnicas Marcombo
- NTE INEN 2489:2009 (2009). Gas Natural (1a ed.). Requisitos. Quito.
- Sanz, M., Patiño, M. (2014). Manual práctico del operador de calderas industriales Madrid: Ediciones Paraninfo S.A.
- Soto, J. (1996). Fundamentos sobre ahorro energía México: Ediciones de la Universidad Autónoma de Yucatán

Taplin, H. (2015). Boiler Plant and Distribution System Optimization Manual. (3a ed.)
Georgia: The Fairmont Press, Inc.

Testo. (2007). Análisis de gases de combustión en la industria. (2a ed.)

Walpole, R., Myers, R., y Myers, S. (2012). Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias. (9a ed.). México: Pearson

Linkografía

Budin, R., Mihelic, A.; Ć, y Vujasinovic, E. (2007). Cogeneration and Heat Recovery in the Industrial Process. Kim Inst. <http://pierre.fkit.hr/hdki/kui/vol56/broj11/551.pdf>. [Consultado: 07-ago-2015].

CALIDAD AMBIENTAL CYAMBIENTE. Biblioteca virtual. Decreto 1215 <http://www.calidadambiental.com.ec/>. [Consulta: 26-dic-2015]

CONNUE. (2009). Tipos de trampas de vapor I. <http://www.conuee.gob.mx/>. [Consultado: 07-sep-2015].

Domínguez, R. (2013). Boquillas a atomización Quemadores. Ingeniería Energética General. <http://www.energynow.com> [Consultado: 20-ago-2015].

Energy Information Administration. Natural gas futures prices. <http://www.eia.gov>. [Consulta: 08-ene-2016]

Fiscal, R. (2007). Metodología de análisis para estudios de factibilidad técnica económica en sistemas de generación eléctrica costa fuera. Tendencias tecnológicas.

Golato, M., Aso, G., Paz, D., y Cárdenas G. Inyección de aire secundario caliente en calderas de vapor bagaceras y su influencia en el rendimiento térmico. Revista Industrial y Agrícola de Tucumán. Tomo 82. <http://www.scielo.org.ar/pdf/riat/v82n1-2/v82n1-2a03.pdf>. [Consultado: 07-ago-2015].

Spirax Sarco. Trampas de vapor. <http://www2.spiraxsarco.com/ar/>. [Consultado: 07-jul-2015].

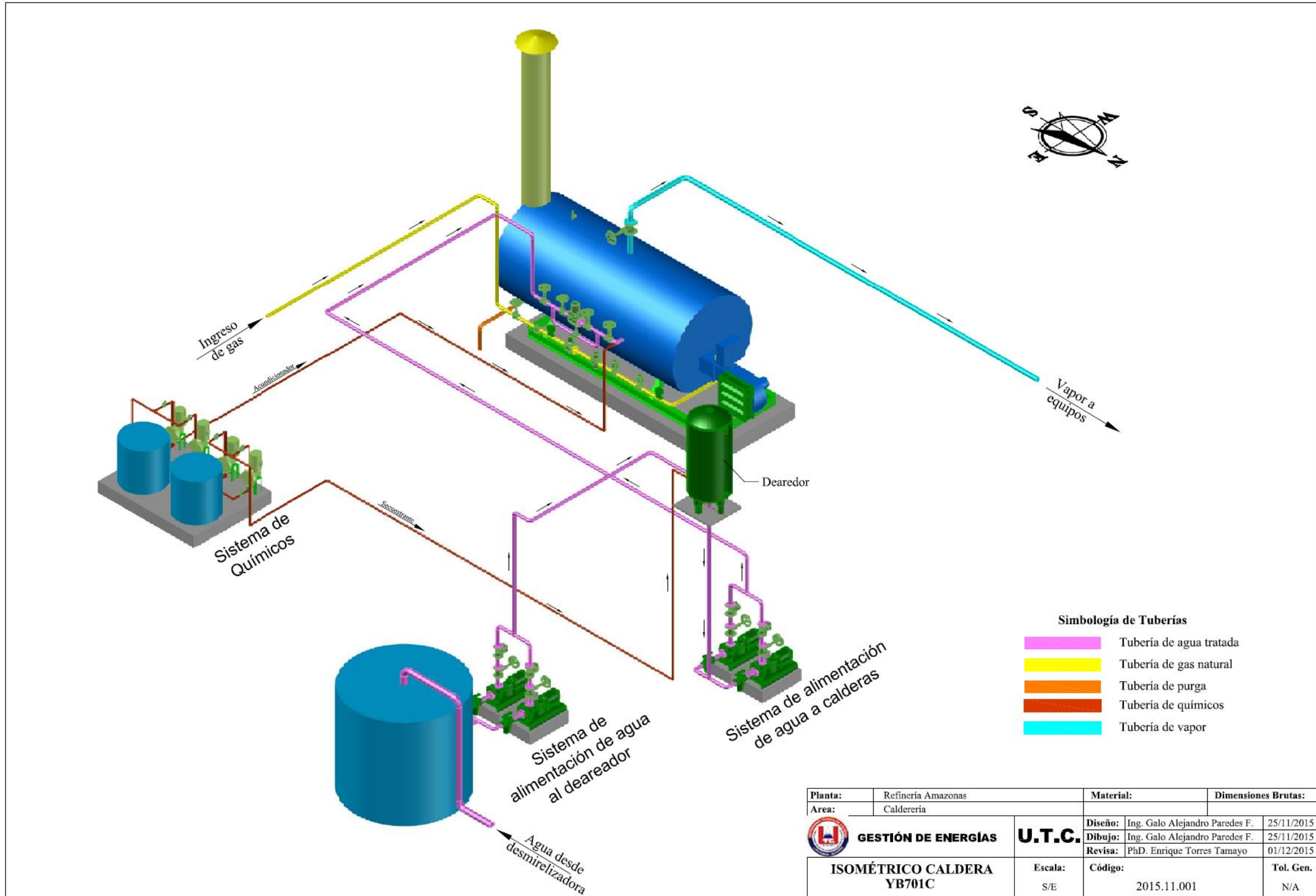
Testo. (2010). Optimización de la Combustión. Tiempo Real S.A. <http://www.tiemporeal.es/archivos/optimizacioncombustion.pdf>. [Consultado: 20-sep-2015].

Ventas y mantenimiento de equipo técnico. <http://www.venamet.com> [Consultado: 18-ene-2016].

Webster Combustion Technology. Bulletin 950046. <http://webster-engineering.com>. [Consultado: 07-dic-2015].

ANEXOS

Anexo1 Isométrico general de la caldera



Anexo 2 Cromatografías del gas combustible

Cromatografía 1 – Gas combustible Tipo 1

ANALISIS CROMATOGRAFICO DE GASES - PETROPRODUCCION D. A.

LOCALIZACION DE LA MUESTRA : GAS A CALDERA A REFINERIA 1
 COMPANIA : REFINACION CIS
 FECHA DE TOMA DE MUESTRA : OCTUBRE 18 2015
 FECHA DE ANALISIS : OCTUBRE 18 2015 EVALUADO POR: LUIS ROBALINO
 EVALUADO POR :

RESULTADOS DEL ANALISIS DEL GAS (*) : NO MEDIDO

	FRACCION o % MOLAR	GPnteorico	OCTANAGE
NITROGENO (N2)	= 5.557		
DIOXIDO DE CARBONO (CO2)	= 4.651		
SULFURO DE HIDROGENO (H2S)	= *		
METANO (C1)	= 76.707		120.000
ETANO (C2)	= 10.342		100.700
PROPANO (C3)	= 2.743	0.753	97.100
I-BUTANO (I-C4)	= 0.000	0.000	97.600
N-BUTANO (N-C4)	= 0.000	0.000	89.100
I-PENTANO (I-C5)	= 0.000	0.000	89.700
N-PENTANO (N-C5)	= 0.000	0.000	61.900
N-HEXANO (N-C6)	= 0.000	0.000	26.000
N-HEPTANO (N-C7)	= 0.000	0.000	
N-OCTANO (N-C8)	= *		
N-NOVANO (N-C9)	= *		
N-DECANO (N-C10)	= *		
OXIGENO (O2)	= *		
HYDROGENO (H2)	= *		
HELIO (HE)	= *		
AGUA (H2O)	= *		

 TOTAL = 100.000 0.753 105.126

CONSTANTES FISICO-QUIMICAS DEL GAS

GRAVEDAD DEL GAS (AIRE=1.0) = 0.698
 Contenido liquido del gas GPN(gins/mscf)= 0.753
 Contenido teórico de agua (lbs/MMscf)= 847.349
 PESO MOLECULAR DEL GAS = 20.227
 CORRECCION WICHELT-AZIZ (GRA. F.) = 6.700
 TEMPERATURA PSEUDOCRITICA (GRA. R.) = 376.351
 TC* (GRA.R.) = 369.652
 PRESION PSEUDOCRITICA (PSIA) = 679.563
 PC* (PSIA) = 667.466
 VALOR CALORIFICO NETO (BTU/SCF) = 928.187
 VALOR CALORIFICO BRUTO SECO (BTU/SCF) = 1026.492
 VALOR CALORIFICO BRUTO HUMEDO (BTU/SCF) = 1008.631
 OCTANAGE, GAS COMBUSTIBLE (MOTOR METHOD)= 105.126
 Temperatura de flujo (GRAD. FAR.) = 113.000
 Presion de flujo (psia) = 79.700
 Calor especifico a P-cte: CP(BTU/LBM*F) = 0.466
 Calor especifico a V-cte: CV(BTU/LBM*F) = 0.368 @ T= 50°F T= 300°F
 Relacion de CP/CV, K (adimen.) = 1.267 1.284 1.225
 Desviacion del gas real Z (adimen.) = 0.989
 Viscosidad del gas Ug (cp) = 0.0116
 Compresibilidad del gas Cg (1/psia) = 1.268E-02
 Factor volumetrico del gas Bg (ft³/scf)= 2.012E-01

caldera1.GAS

Cromatografía 2 - Gas combustible Tipo 2

ANALISIS CROMATOGRAFICO DE GASES - PETROPRODUCCION D. A.
--

LOCALIZACION DE LA MUESTRA : GAS ENTRADA CALDERA D REFINERIA CIS
 COMPAÑIA : REFINACION
 FECHA DE TOMA DE MUESTRA : ABRIL 17 2016
 FECHA DE ANALISIS : ABRIL 17 2016 EVALUADO POR: LUIS ROBALINO
 EVALUADO POR :

RESULTADOS DEL ANALISIS DEL GAS (*) : NO MEDIDO

	FRACCION o % MOLAR	GPHteorico	OCTANAGE
NITROGENO (N2)	= 9.501		
DIOXIDO DE CARBONO (CO2)	= 13.702		
SULFURO DE HIDROGENO (H2S)	= *		
METHANO (C1)	= 65.136		120.000
ETHANO (C2)	= 8.490		100.700
PROPANO (C3)	= 3.171	0.871	97.100
I-BUTANO (I-C4)	= 0.000	0.000	97.600
N-BUTANO (N-C4)	= 0.000	0.000	89.100
I-PENTANO (I-C5)	= 0.000	0.000	89.700
N-PENTANO (N-C5)	= 0.000	0.000	61.900
N-HEXANO (N-C6)	= 0.000	0.000	26.000
N-HEPTANO (N-C7)	= 0.000	0.000	
N-OCTANO (N-C8)	= *		
N-NOVANO (N-C9)	= *		
N-DECANO (N-C10)	= *		
OXIGENO (O2)	= *		
HIDROGENO (H2)	= *		
HELIO (HE)	= *		
AGUA (H2O)	= *		

TOTAL	= 100.000	0.871	89.792

CONSTANTES FISICO-QUIMICAS DEL GAS

GRAVEDAD DEL GAS (AIRE=1.0)	= 0.797		
Contenido liquido del gas GPH(glns/mscf)	= 0.871		
Contenido teorico de agua (lbs/Mmscf)	= 715.197		
PESO MOLECULAR DEL GAS	= 23.091		
CORRECCION WIEBERT-AZIZ (GRA. F.)	= 15.069		
TEMPERATURA PSEUDOCRITICA (GRA. R.)	= 387.854		
TC* (GRA. R.)	= 372.785		
PRESION PSEUDOCRITICA (PSIA)	= 768.292		
PC* (PSIA)	= 660.687		
VALOR CALORIFICO NETO (BTU/SCF)	= 802.946		
VALOR CALORIFICO BRUTO SECO (BTU/SCF)	= 867.676		
VALOR CALORIFICO BRUTO HUMEDO (BTU/SCF)	= 872.230		
OCTANAGE, GAS COMBUSTIBLE (MOTOR METHOD)	= 89.792		
Temperatura de flujo (GRAD. FAR.)	= 68.000		
Presion de flujo (psia)	= 22.700		
Calor especifico a P=cte: CP(BTU/LBM*F)	= 0.391		
Calor especifico a V=cte: CV(BTU/LBM*F)	= 0.305		
Relacion de CP/CV, K (adimen.)	= 1.282	@ T= 50°F	T= 300°F
Desviacion del gas real Z (adimen.)	= 0.996	1.287	1.230
Viscosidad del gas U _g (cp)	= 0.0102		
Compresibilidad del gas C _g (1/psia)	= 4.423E-02		
Factor volumetrico del gas B _g (ft ³ /scf)	= 5.554E-01		

gascalrd.GAS

Anexo 3 Propiedades del agua saturada

Agua saturada. Tabla de temperaturas

Temp., T °C	Pres. sat., P_{sat} kPa	Volumen específico, m^3/kg			Energía interna, kJ/kg			Entalpía, kJ/kg			Entropía, $kJ/kg \cdot K$		
		Líquido sat., v_f	Vapor sat., v_g		Líquido sat., u_f	Evapor., u_{fg}	Vapor sat., u_g	Líquido sat., h_f	Evapor., h_{fg}	Vapor sat., h_g	Líquido sat., s_f	Evapor., s_{fg}	Vapor sat., s_g
0.01	0.6117	0.001000	206.00	0.000	2374.9	2374.9	0.001	2500.9	2500.9	0.0000	9.1556	9.1556	
5	0.8725	0.001000	147.03	21.019	2360.8	2381.8	21.020	2489.1	2510.1	0.0763	8.9487	9.0249	
10	1.2281	0.001000	106.32	42.020	2346.6	2388.7	42.022	2477.2	2519.2	0.1511	8.7488	8.8999	
15	1.7057	0.001001	77.885	62.980	2332.5	2395.5	62.982	2465.4	2528.3	0.2245	8.5559	8.7803	
20	2.3392	0.001002	57.762	83.913	2318.4	2402.3	83.915	2453.5	2537.4	0.2965	8.3696	8.6661	
25	3.1698	0.001003	43.340	104.83	2304.3	2409.1	104.83	2441.7	2546.5	0.3672	8.1895	8.5567	
30	4.2469	0.001004	32.879	125.73	2290.2	2415.9	125.74	2429.8	2555.6	0.4368	8.0152	8.4520	
35	5.6291	0.001006	25.205	146.63	2276.0	2422.7	146.64	2417.9	2564.6	0.5051	7.8466	8.3517	
40	7.3851	0.001008	19.515	167.53	2261.9	2429.4	167.53	2406.0	2573.5	0.5724	7.6832	8.2556	
45	9.5953	0.001010	15.251	188.43	2247.7	2436.1	188.44	2394.0	2582.4	0.6386	7.5247	8.1633	
50	12.352	0.001012	12.026	209.33	2233.4	2442.7	209.34	2382.0	2591.3	0.7038	7.3710	8.0748	
55	15.763	0.001015	9.5639	230.24	2219.1	2449.3	230.26	2369.8	2600.1	0.7680	7.2218	7.9898	
60	19.947	0.001017	7.6670	251.16	2204.7	2455.9	251.18	2357.7	2608.8	0.8313	7.0769	7.9082	
65	25.043	0.001020	6.1935	272.09	2190.3	2462.4	272.12	2345.4	2617.5	0.8937	6.9360	7.8296	
70	31.202	0.001023	5.0396	293.04	2175.8	2468.9	293.07	2333.0	2626.1	0.9551	6.7989	7.7540	
75	38.597	0.001026	4.1291	313.99	2161.3	2475.3	314.03	2320.6	2634.6	1.0158	6.6655	7.6812	
80	47.416	0.001029	3.4053	334.97	2146.6	2481.6	335.02	2308.0	2643.0	1.0756	6.5355	7.6111	
85	57.868	0.001032	2.8261	355.96	2131.9	2487.8	356.02	2295.3	2651.4	1.1346	6.4089	7.5435	
90	70.183	0.001036	2.3593	376.97	2117.0	2494.0	377.04	2282.5	2659.6	1.1929	6.2853	7.4782	
95	84.609	0.001040	1.9808	398.00	2102.0	2500.1	398.09	2269.6	2667.6	1.2504	6.1647	7.4151	
100	101.42	0.001043	1.6720	419.06	2087.0	2506.0	419.17	2256.4	2675.6	1.3072	6.0470	7.3542	
105	120.90	0.001047	1.4186	440.15	2071.8	2511.9	440.28	2243.1	2683.4	1.3634	5.9319	7.2952	
110	143.38	0.001052	1.2094	461.27	2056.4	2517.7	461.42	2229.7	2691.1	1.4188	5.8193	7.2382	
115	169.18	0.001056	1.0360	482.42	2040.9	2523.3	482.59	2216.0	2698.6	1.4737	5.7092	7.1829	
120	198.67	0.001060	0.89133	503.60	2025.3	2528.9	503.81	2202.1	2706.0	1.5279	5.6013	7.1292	
125	232.23	0.001065	0.77012	524.83	2009.5	2534.3	525.07	2188.1	2713.1	1.5816	5.4956	7.0771	
130	270.28	0.001070	0.66808	546.10	1993.4	2539.5	546.38	2173.7	2720.1	1.6346	5.3919	7.0265	
135	313.22	0.001075	0.58179	567.41	1977.3	2544.7	567.75	2159.1	2726.9	1.6872	5.2901	6.9773	
140	361.53	0.001080	0.50850	588.77	1960.9	2549.6	589.16	2144.3	2733.5	1.7392	5.1901	6.9294	
145	415.68	0.001085	0.44600	610.19	1944.2	2554.4	610.64	2129.2	2739.8	1.7908	5.0919	6.8827	
150	476.16	0.001091	0.39248	631.66	1927.4	2559.1	632.18	2113.8	2745.9	1.8418	4.9953	6.8371	
155	543.49	0.001096	0.34648	653.19	1910.3	2563.5	653.79	2098.0	2751.8	1.8924	4.9002	6.7927	
160	618.23	0.001102	0.30680	674.79	1893.0	2567.8	675.47	2082.0	2757.5	1.9426	4.8066	6.7492	
165	700.93	0.001108	0.27244	696.46	1875.4	2571.9	697.24	2065.6	2762.8	1.9923	4.7143	6.7067	
170	792.18	0.001114	0.24260	718.20	1857.5	2575.7	719.08	2048.8	2767.9	2.0417	4.6233	6.6650	
175	892.60	0.001121	0.21659	740.02	1839.4	2579.4	741.02	2031.7	2772.7	2.0906	4.5335	6.6242	
180	1002.8	0.001127	0.19384	761.92	1820.9	2582.8	763.05	2014.2	2777.2	2.1392	4.4448	6.5841	
185	1123.5	0.001134	0.17390	783.91	1802.1	2586.0	785.19	1996.2	2781.4	2.1875	4.3572	6.5447	
190	1255.2	0.001141	0.15636	806.00	1783.0	2589.0	807.43	1977.9	2785.3	2.2355	4.2705	6.5059	
195	1398.8	0.001149	0.14089	828.18	1763.6	2591.7	829.78	1959.0	2788.8	2.2831	4.1847	6.4678	
200	1554.9	0.001157	0.12721	850.46	1743.7	2594.2	852.26	1939.8	2792.0	2.3305	4.0997	6.4302	

Fuente: Cengel, *et al.* (2011) Termodinámica. (7a ed.)

Anexo 4 Masa molar de las sustancias

Masa molar, constante de gas y propiedades del punto crítico

Sustancia	Fórmula	Masa molar, <i>M</i> kg/kmol	Constante de gas, <i>R</i> kJ/kg · K*	Propiedades del punto crítico		
				Temperatura, K	Presión, MPa	Volumen, m ³ /kmol
Agua	H ₂ O	18.015	0.4615	647.1	22.06	0.0560
Aire	—	28.97	0.2870	132.5	3.77	0.0883
Alcohol etílico	C ₂ H ₅ OH	46.07	0.1805	516	6.38	0.1673
Alcohol metílico	CH ₃ OH	32.042	0.2595	513.2	7.95	0.1180
Amoniaco	NH ₃	17.03	0.4882	405.5	11.28	0.0724
Argón	Ar	39.948	0.2081	151	4.86	0.0749
Benceno	C ₆ H ₆	78.115	0.1064	562	4.92	0.2603
Bromo	Br ₂	159.808	0.0520	584	10.34	0.1355
<i>n</i> -Butano	C ₄ H ₁₀	58.124	0.1430	425.2	3.80	0.2547
Cloro	Cl ₂	70.906	0.1173	417	7.71	0.1242
Cloroformo	CHCl ₃	119.38	0.06964	536.6	5.47	0.2403
Cloruro metílico	CH ₃ Cl	50.488	0.1647	416.3	6.68	0.1430
Criptón	Kr	83.80	0.09921	209.4	5.50	0.0924
Diclorodifluorometano (R-12)	CCl ₂ F ₂	120.91	0.06876	384.7	4.01	0.2179
Diclorofluorometano (R-21)	CHCl ₂ F	102.92	0.08078	451.7	5.17	0.1973
Dióxido de carbono	CO ₂	44.01	0.1889	304.2	7.39	0.0943
Dióxido de sulfuro	SO ₂	64.063	0.1298	430.7	7.88	0.1217
Etano	C ₂ H ₆	30.070	0.2765	305.5	4.48	0.1480
Etileno	C ₂ H ₄	28.054	0.2964	282.4	5.12	0.1242
Helio	He	4.003	2.0769	5.3	0.23	0.0578
<i>n</i> -Hexano	C ₆ H ₁₄	86.179	0.09647	507.9	3.03	0.3677
Hidrógeno (normal)	H ₂	2.016	4.1240	33.3	1.30	0.0649
Metano	CH ₄	16.043	0.5182	191.1	4.64	0.0993
Monóxido de carbono	CO	28.011	0.2968	133	3.50	0.0930
Neón	Ne	20.183	0.4119	44.5	2.73	0.0417
Nitrógeno	N ₂	28.013	0.2968	126.2	3.39	0.0899
Óxido nitroso	N ₂ O	44.013	0.1889	309.7	7.27	0.0961
Oxígeno	O ₂	31.999	0.2598	154.8	5.08	0.0780
Propano	C ₃ H ₈	44.097	0.1885	370	4.26	0.1998
Propileno	C ₃ H ₆	42.081	0.1976	365	4.62	0.1810
Tetracloruro de carbono	CCl ₄	153.82	0.05405	556.4	4.56	0.2759
Tetrafluoroetano (R-134a)	CF ₃ CH ₂ F	102.03	0.08149	374.2	4.059	0.1993
Triclorofluorometano (R-11)	CCl ₃ F	137.37	0.06052	471.2	4.38	0.2478
Xenón	Xe	131.30	0.06332	289.8	5.88	0.1186

*La unidad en kJ/kg · K es equivalente a kPa · m³/kg · K. La constante de gas se calcula de $R = R_u/M$, donde $R_u = 8.31447$ kJ/kmol · K y M es la masa molar.

Fuente: K. A. Kobe y R. E. Lynn, Jr., *Chemical Review* 52 (1953), pp. 117–236; y ASHRAE, *Handbook of Fundamentals* (Atlanta, GA: Sociedad Americana de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Acondicionamiento de Aire, Inc., 1993), pp. 16.4 y 36.1.

Fuente: Cengel, *et al.* (2011) *Termodinámica*. (7a ed.)

Anexo 5 Propiedades de algunos combustibles

Propiedades de algunos combustibles e hidrocarburos comunes

Combustible (fase)	Fórmula	Masa molar, kg/kmol	Densidad, ¹ kg/L	Entalpía de vaporización, ² kJ/kg	Calor específico, ¹ c_p , kJ/kg · K	Poder calorífico superior, ³ kJ/kg	Poder calorífico inferior, ³ kJ/kg
Acetileno (g)	C ₂ H ₂	26.038	—	—	1.69	49,970	48,280
Benceno (ℓ)	C ₆ H ₆	78.114	0.877	433	1.72	41,800	40,100
Butano (ℓ)	C ₄ H ₁₀	58.123	0.579	362	2.42	49,150	45,370
Carbono (s)	C	12.011	2	—	0.708	32,800	32,800
Decano (ℓ)	C ₁₀ H ₂₂	142.285	0.730	361	2.21	47,640	44,240
Diesel ligero (ℓ)	C _n H _{1.8n}	170	0.78–0.84	270	2.2	46,100	43,200
Diesel pesado (ℓ)	C _n H _{1.7n}	200	0.82–0.88	230	1.9	45,500	42,800
Etano (g)	C ₂ H ₆	30.070	—	172	1.75	51,900	47,520
Etanol (ℓ)	C ₂ H ₆ O	46.069	0.790	919	2.44	29,670	26,810
Gas natural (g)	C _n H _{3.8n} N _{0.1n}	18	—	—	2	50,000	45,000
Gasolina (ℓ)	C _n H _{1.87n}	100–110	0.72–0.78	350	2.4	47,300	44,000
Heptano (ℓ)	C ₇ H ₁₆	100.204	0.684	365	2.24	48,100	44,600
Hexano (ℓ)	C ₆ H ₁₂	84.161	0.673	392	1.84	47,500	44,400
Hexeno (ℓ)	C ₆ H ₁₄	86.177	0.660	366	2.27	48,310	44,740
Hidrógeno (g)	H ₂	2.016	—	—	14.4	141,800	120,000
Isopentano (ℓ)	C ₅ H ₁₂	72.150	0.626	—	2.32	48,570	44,910
Metano (g)	CH ₄	16.043	—	509	2.20	55,530	50,050
Metanol (ℓ)	CH ₄ O	32.042	0.790	1168	2.53	22,660	19,920
Monóx. de carbono (g)	CO	28.013	—	—	1.05	10,100	10,100
Octano (ℓ)	C ₈ H ₁₈	114.231	0.703	363	2.23	47,890	44,430
1-Penteno (ℓ)	C ₅ H ₁₀	70.134	0.641	363	2.20	47,760	44,630
Propano (ℓ)	C ₃ H ₈	44.097	0.500	335	2.77	50,330	46,340
Tolueno (ℓ)	C ₇ H ₈	92.141	0.867	412	1.71	42,400	40,500

¹A 1 atm y 20°C.

²A 25°C para combustibles líquidos, y 1 atm y temperatura normal de ebullición para combustibles gaseosos.

³A 25°C. Multiplique por la masa molar para obtener los valores caloríficos en kJ/kmol.

Fuente: Cengel, *et al.* (2011) Termodinámica. (7a ed.)

Anexo 6 Requisitos del gas natural según NTE-INEN 2489:2009

TABLA 1. Requisitos del gas natural

REQUISITOS	UNIDAD	Mínimo	Máximo	Métodos de Ensayo
Poder calorífico superior	MJ/m ³	35,42	43,12	ASTM D 1945 ASTM D 3588 ISO 6976
Índice de wobbe	MJ/m ³	45,8	50,6	ASTM D 3588 ISO 6976
Sulfuro de hidrógeno (H ₂ S)*	mg/m ³	--	6,1	ASTM D 4084
Azufre total (S)**	mg/m ³	--	15,0	ASTM D 5504 ASTM D 6228
Φ _{Oxígeno} ***	%	--	0,2	ASTM D 4530
Inertes				ASTM D 1945
Φ _{Nitrógeno (N₂)}	%	--	5,0	
Φ _{Dióxido de carbono (CO₂)****}	%	--	3,0	
Φ _{Total de inertes}	%	--	5,0	
Humedad (H ₂ O)*****	mg/m ³	--	65	ASTM D 1142 ISO 6327
Contenido de licuables a partir del propano (C ₃₊)*****	l/m ³	--	0,045	ASTM D 1945 ISO 6975
O bien temperatura de rocío de hidrocarburos de 1 a 8 000 kPa	K (°C)	--	271,15(-2)	ASTM D 1142 ASTM D 1945 ISO 6975
Metanos	%	80		

***Sulfuro de hidrógeno (H₂S).** Compuesto químico presente en bajas cantidades en el gas natural seco, el cual, no solo tiene una gran acción corrosiva sobre el material de las tuberías (ante la presencia de un alto contenido de vapor de agua), sino que además es un contaminante de alta toxicidad para el ser humano (10 ppmv es el límite permisible de exposición –Occupational Safety and Health Administration 1990-, 150ppmv provocan la pérdida del olfato y más de 500 ppmv pueden ocasionar la muerte –National Safety Council 1982-).

****Azufre (S).** Compuesto químico presente en bajas cantidades en el gas natural en la forma de compuestos sulfurados orgánicos e inorgánicos como el sulfuro de carbonilo (COS), disulfuro de carbono (CS₂), los tioéteres (RSR), los tioácidos (RCOSH), los sulfóxidos (RSOR), las sulfonas (RSO₂R) y los mercaptanos (RSH). La concentración de este elemento y sus formas químicas debe reducirse por sus propiedades altamente corrosivas y porque en la combustión son generadores de óxidos de azufre (SO_x) considerados como componentes de la lluvia ácida.

*****Oxígeno (O₂).** Elemento químico presente en bajas cantidades en el gas natural seco, que debe controlarse para evitar corrosión en tuberías de acero en presencia de humedad. Se debe tener en cuenta el efecto del oxígeno junto con el sulfuro de hidrógeno en la corrosión del cobre de los sistemas domiciliarios

******Dióxido de carbono (CO₂).** Compuesto químico inerte presente en el gas natural seco, en ausencia o en muy bajo contenido de vapor de agua no es corrosivo. Sin embargo, en presencia de vapor de agua forma el ácido carbónico que produce corrosión en los sistemas de tuberías metálicas. Actúa como producto inerte reduciendo el contenido calórico del gas en su utilización como combustible.

*******Humedad (H₂O).** Contenido de vapor de agua en el gas natural seco, en altas concentraciones provoca perjuicios en el sistema de tuberías para el transporte. Forma hidratos que pueden obstruir parcial o totalmente el gasoducto. Asimismo, por reacción química con el dióxido de carbono y/o el sulfuro de hidrógeno también presentes en el gas forma ácidos que tienen acción corrosiva sobre el material. Es importante por lo tanto su deshidratación

*******Los hidrocarburos condensables.** Son productos que durante el transporte, dependiendo de la presión y la temperatura de operación, pueden condensar reduciendo la sección útil de la tubería, generando pérdidas de carga y potencia; como así también errores en los sistemas de medición e inconvenientes diversos en los sistemas de regulación y distribución. Por estas razones es importante la medición del punto de rocío de hidrocarburos.

Anexo 7 Características del quemador Webster

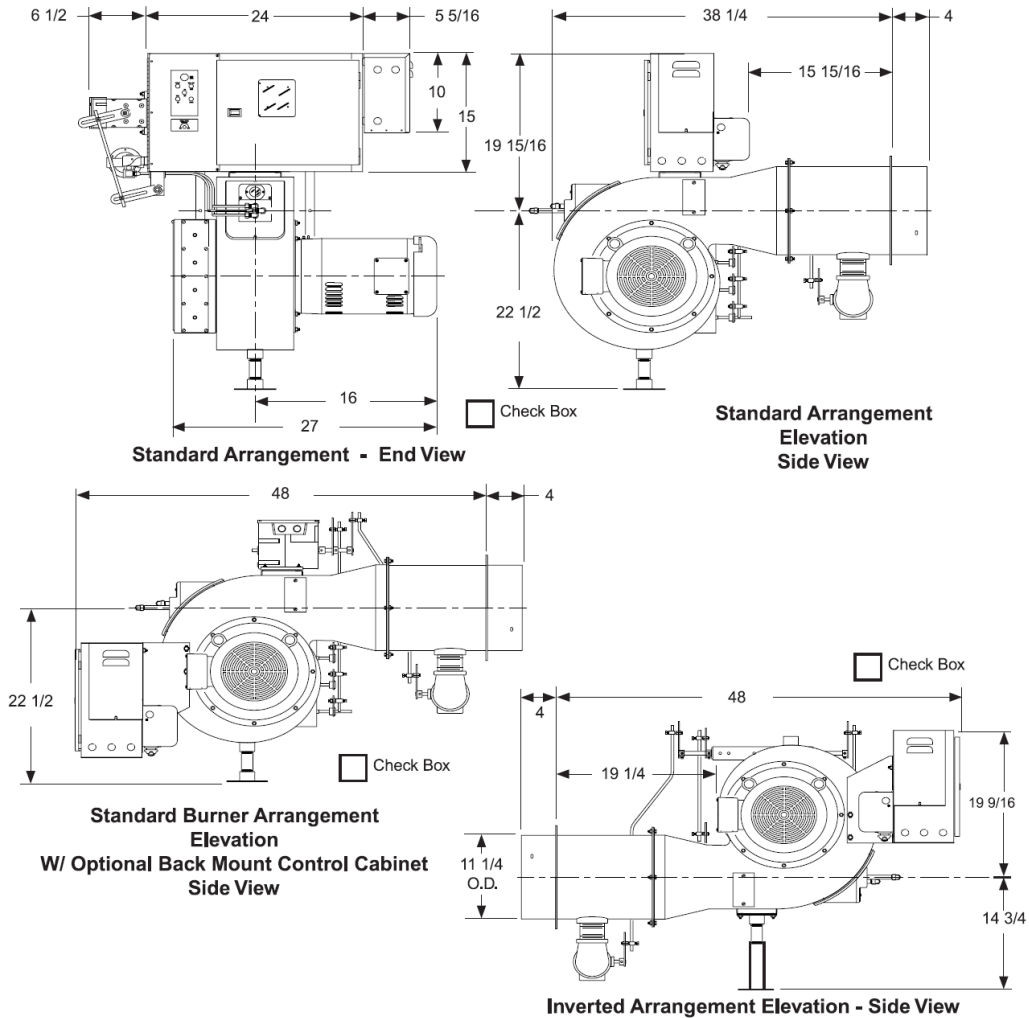


Model JB3 Forced Draft Burners Specification & Dimensional Data (1400 - 12,600 MBH Input)

Fuels Burned and Control Systems

- Natural Gas, Propane, Digester or Mixed Gases
- Light #2 through Heavy #6 Fuel Oil
- Modulating Control System - Micro Modulation or Linkage
- Control Circuit Requires 120 vac, 60 Hz, Single Phase Voltage Supply

Check appropriate box to indicated selected version. (Dimensions are +/- 1/4 inch)



Model JB3 burners are listed by Underwriters Laboratories, Inc. (UL / ULC). Also by the State of Massachusetts Fire Marshal, City of New York Board of Standards and Appeals, State of Minnesota and can be packaged to meet specific requirements of IRI, FM, GE GAP, NFPA, MIL spec. or other special insurance or local code requirements.

Model JB3 - Specification Data (1400 - 12,600 MBH Input)

(1) STANDARD UL EQUIPMENT AND IMPORTANT OPTIONS		Gas	No. 2 Oil		No. 4 - 6 Oil	STANDARD UL EQUIPMENT AND IMPORTANT OPTIONS		Gas	No. 2 Oil		No. 4 - 6 Oil
			Pressure Atomized	Air Atomized					Pressure Atomized	Air Atomized	
General	Motor, Fan and Air Inlet Control	X	X	X	X	Gas Fuel	Main Manual Shutoff Valve	X			
	Air Flow Switch	X	X	X	X		Main Safety Shutoff Valve	X			
	(2) Burner Mounted Control Panel, Switch and Four Indicator Lights	X	X	X	X		Second Safety Shutoff Valve	X			
	Flame Safety Control	X	X	X	X		Main Gas Regulator	X			
	Ultra Violet Scanner	X	X	X	X		Gas Checking Valve	X			
	Motor Starter with Overloads	X	X	X	X		High and Low Gas Pressure Switches	X			
	Fuel Selector Switch	Duel Fuel Burners Only					Metering Valve (modulating systems)	X			
Ignition	Proven Gas Pilot Ignition	X		X	X	Oil Fuel	Normal Open Vent Valve (above 12,500 MBH)	X			
	Pilot Solenoid Gas Valve	X		X	X		Oil Drawer Assembly with Diffuser		X	X	X
	Pilot Gas Regulator & Manual Valve	X		X	X		Oil Nozzles		X	X	X
	Pilot Gas Ignition Transformer	X		X	X		Oil Heater with Integral Thermostat				X
Options	Inverted Housing	X	X	X	X		Remote Oil Pump		X	Opt.	Opt.
	Alternate Control Cabinet Positioning	X	X	X	X		Two Safety Shutoff Valves		X	X	X
	Remote Control Panel	X	X	X	X		High Oil Temperature Switch				X
	Fuel Metering CAM-NETIC II	X	X	X	X		Low Air Atomizing Switch				X
	Posi-Control	X	X	X	X		Low Oil Pressure Switch		X	X	X
							Oil Pressure Gauge		X	X	X
							Oil Metering Valve		X	X	X
							Future Gas Combustion Head		Opt.	Opt.	Opt.
							Air Compressor			X	X

1. The configuration of each unit will vary with specific job requirements such as input rating, electrical specification and special agency approval codes. The above chart shows those items standard to a basic burner plus a few options that may be added.
 2. Indicator lights are "Power On", "Call for Heat", "Fuel On" and "Flame Fail"

Model JB3 - Sizing and Application Data (contact Webster for complete information)

Model Number	Maximum Furnace Pressure	Burner Firing Capability Range			Burner Motor HP	Gas Train		#2 Oil Pump Motor HP		#4 - 6 Pump Motor HP	Air Compressor Motor HP
		Gas scfh	#2 Oil gph	#4-6 Oil gph		Pipe Size	Inlet Press	Pressure Atomizing	Air Atomizing		
JB3-30	3.5	1400 / 6300	10.2 / 45	10 / 42	3	2 1/2"	12 / 27"	1	Optional	Optional	2
JB3-50	3.5	1400 / 8300	11 / 59.2	10 / 55.3	5	3"	15 / 27"	1 1/2	Optional	Optional	2
JB3-75	3.5	1600 / 10500	12.3 / 75	11 / 70	7 1/2	3"	23 / 27"	1	Optional	Optional	2
JB3-100	3.5	1800 / 12600	20.3 / 90	12 / 84	10	3"	2-5 psi	1	Optional	Optional	2

The above maximum ratings are based on 0 furnace pressure, an altitude of 1000 feet, 90°F air temperature and 60 HZ electrical supply. Use the following corrections for higher temperatures and altitude. Capacity by 17% for 50 Hertz.
 Capacity decreases by 4% for each 1000 feet above 1000 foot altitude.
 Capacity decreases by 6% for each 1 inch of furnace pressure.
 Capacity decreases by 2% for each 10°F increase in air temperature over 90°F.
 Gas input ratings based on 1000 BTU/cu ft. and 0.64 specific gravity. Sizes and pressure will vary with gas.
 Oil input ratings are based on 140,000 BTU/gal. for ASTM #2 fuel oil and 150,000 BTU/gal for ASTM #4-6 fuel oil.
 The vessel draft must be between -0.1 and +0.1 wc.

Essential Ordering Information and Data:

Power Supply - Confirm 120-60-1 for control circuit and electrical supply for burner motor(s) (voltage, frequency and phase).
 Describe Boiler or Heater to be Fired - Including the manufacturer, model number, furnace pressure and furnace size.
 Firing Rate - Define firing rates in MBH for gas and GPH for oil.
 Fuel to be Burned - Type of gas and/or oil, including the BTU value.
 Approval Agency - UL, FM, IRI (GE GAP), CSD-1, NFPA, Mil spec and local codes, if applicable.
 Flame Safety Control Preferred - Honeywell or Fireye controls.
 Gas Train Components Preferred - ASCO/ITT, Honeywell or Landis
 Control System - ON-OFF, Low Fire Start, Low High Low, Modulation, Posi-Control
 Required Options - Mounting plate, operating controls, limit controls, etc.

Anexo 8 Propiedades de los metales

Propiedades de metales sólidos (continuación)

Composición	Punto de fusión, K	Propiedades a 300 K				Propiedades a varias temperaturas (K), $k(W/m \cdot K)/c_p(J/kg \cdot K)$					
		ρ kg/m ³	C_p J/kg · K	k W/m · K	$\alpha \times 10^6$ m ² /s	100	200	400	600	800	1 000
Al carbono-manganeso-silicio (1% < Mn < 1.65% 0.1% < Si < 0.6%)		8 131	434	41.0	11.6			42.2 487	39.7 559	35.0 685	27.6 1 090
Aceros al cromo (bajo): $\frac{1}{2}$ Cr- $\frac{1}{4}$ Mo-Si (0.18% C, 0.65% Cr, 0.23% Mo, 0.6% Si)		7 822	444	37.7	10.9			38.2	36.7	33.3	26.9
1Cr- $\frac{1}{2}$ Mo (0.16% C, 1% Cr, 0.54% Mo, 0.39% Si)		7 858	442	42.3	12.2			492 42.0	575 39.1	688 34.5	969 27.4
1Cr-V (0.2% C, 1.02% Cr, 0.15% V)		7 836	443	48.9	14.1			492 46.8	575 42.1	688 36.3	969 28.2
Aceros inoxidables:											
AISI 302		8 055	480	15.1	3.91			17.3 512	20.0 559	22.8 585	25.4 606
AISI 304	1 670	7 900	477	14.9	3.95	9.2 272	12.6 402	16.6 515	19.8 557	22.6 582	25.4 611
AISI 316		8 238	468	13.4	3.48			15.2 504	18.3 550	21.3 576	24.2 602
AISI 347		7 978	480	14.2	3.71			15.8 513	18.9 559	21.9 585	24.7 606
Plomo	601	11 340	129	35.3	24.1	39.7 118	36.7 125	34.0 132	31.4 142		
Magnesio	923	1 740	1 024	156	87.6	169 649	159 934	153 1 074	149 1 170	146 1 267	
Molibdeno		2 894	10 240	251	138	53.7 179		143 141	134 261	126 275	118 285
Níquel:											
Puro	1 728	8 900	444	90.7	23.0	164 232	107 383	80.2 485	65.6 592	67.6 530	71.8 562
Nicromo (80% Ni, 20% Cr)	1 672	8 400	420	12	3.4			14 480	16 525	21 545	
Inconel X-750 (73% Ni, 15% Cr, 6.7% Fe)	1 665	8 510	439	11.7	3.1	8.7 —	10.3 372	13.5 473	17.0 510	20.5 546	24.0 626
Niobio		2 741	8 570	265	53.7	23.6 188	23.6 249	55.2 274	52.6 274	55.2 283	58.2 292
Paladio		1 827	12 020	244	71.8	24.5 76.5	24.5 71.6	188 73.6	249 73.6	274 79.7	301 86.9
Platino:											
Puro	2 045	21 450	133	71.6	25.1	77.5 100	72.6 125	71.8 136	73.2 141	75.6 146	78.7 152
Aleación 60Pt-40Rh (60% Pt, 40% Rh)	1 800	16 630	162	47	17.4			52 —	59 —	65 —	69 —
Renio	3 453	21 100	136	47.9	16.7	58.9 97	51.0 127	46.1 139	44.2 145	44.1 151	44.6 156
Rodio	2 236	12 450	243	150	49.6	186 147	154 220	146 253	136 274	127 293	121 311

Fuente: Cengel, Y. (2007). Transferencia de calor y masa. (3a ed.)

Anexo 9 Propiedades del aire

TABLA A-15

Propiedades del aire a la presión de 1 atm

Temp., T , °C	Densidad, ρ , kg/m ³	Calor específico, c_p , J/kg · K	Conductividad térmica, k , W/m · K	Difusividad térmica, α , m ² /s ²	Viscosidad dinámica, μ , kg/m · s	Viscosidad cinemática, ν , m ² /s	Número de Prandtl, Pr
-150	2.866	983	0.01171	4.158×10^{-6}	8.636×10^{-6}	3.013×10^{-6}	0.7246
-100	2.038	966	0.01582	8.036×10^{-6}	1.189×10^{-6}	5.837×10^{-6}	0.7263
-50	1.582	999	0.01979	1.252×10^{-5}	1.474×10^{-5}	9.319×10^{-6}	0.7440
-40	1.514	1002	0.02057	1.356×10^{-5}	1.527×10^{-5}	1.008×10^{-5}	0.7436
-30	1.451	1004	0.02134	1.465×10^{-5}	1.579×10^{-5}	1.087×10^{-5}	0.7425
-20	1.394	1005	0.02211	1.578×10^{-5}	1.630×10^{-5}	1.169×10^{-5}	0.7408
-10	1.341	1006	0.02288	1.696×10^{-5}	1.680×10^{-5}	1.252×10^{-5}	0.7387
0	1.292	1006	0.02364	1.818×10^{-5}	1.729×10^{-5}	1.338×10^{-5}	0.7362
5	1.269	1006	0.02401	1.880×10^{-5}	1.754×10^{-5}	1.382×10^{-5}	0.7350
10	1.246	1006	0.02439	1.944×10^{-5}	1.778×10^{-5}	1.426×10^{-5}	0.7336
15	1.225	1007	0.02476	2.009×10^{-5}	1.802×10^{-5}	1.470×10^{-5}	0.7323
20	1.204	1007	0.02514	2.074×10^{-5}	1.825×10^{-5}	1.516×10^{-5}	0.7309
25	1.184	1007	0.02551	2.141×10^{-5}	1.849×10^{-5}	1.562×10^{-5}	0.7296
30	1.164	1007	0.02588	2.208×10^{-5}	1.872×10^{-5}	1.608×10^{-5}	0.7282
35	1.145	1007	0.02625	2.277×10^{-5}	1.895×10^{-5}	1.655×10^{-5}	0.7268
40	1.127	1007	0.02662	2.346×10^{-5}	1.918×10^{-5}	1.702×10^{-5}	0.7255
45	1.109	1007	0.02699	2.416×10^{-5}	1.941×10^{-5}	1.750×10^{-5}	0.7241
50	1.092	1007	0.02735	2.487×10^{-5}	1.963×10^{-5}	1.798×10^{-5}	0.7228
60	1.059	1007	0.02808	2.632×10^{-5}	2.008×10^{-5}	1.896×10^{-5}	0.7202
70	1.028	1007	0.02881	2.780×10^{-5}	2.052×10^{-5}	1.995×10^{-5}	0.7177
80	0.9994	1008	0.02953	2.931×10^{-5}	2.096×10^{-5}	2.097×10^{-5}	0.7154
90	0.9718	1008	0.03024	3.086×10^{-5}	2.139×10^{-5}	2.201×10^{-5}	0.7132
100	0.9458	1009	0.03095	3.243×10^{-5}	2.181×10^{-5}	2.306×10^{-5}	0.7111
120	0.8977	1011	0.03235	3.565×10^{-5}	2.264×10^{-5}	2.522×10^{-5}	0.7073
140	0.8542	1013	0.03374	3.898×10^{-5}	2.345×10^{-5}	2.745×10^{-5}	0.7041
160	0.8148	1016	0.03511	4.241×10^{-5}	2.420×10^{-5}	2.975×10^{-5}	0.7014
180	0.7788	1019	0.03646	4.593×10^{-5}	2.504×10^{-5}	3.212×10^{-5}	0.6992
200	0.7459	1023	0.03779	4.954×10^{-5}	2.577×10^{-5}	3.455×10^{-5}	0.6974
250	0.6746	1033	0.04104	5.890×10^{-5}	2.760×10^{-5}	4.091×10^{-5}	0.6946
300	0.6158	1044	0.04418	6.871×10^{-5}	2.934×10^{-5}	4.765×10^{-5}	0.6935
350	0.5664	1056	0.04721	7.892×10^{-5}	3.101×10^{-5}	5.475×10^{-5}	0.6937
400	0.5243	1069	0.05015	8.951×10^{-5}	3.261×10^{-5}	6.219×10^{-5}	0.6948
450	0.4880	1081	0.05298	1.004×10^{-4}	3.415×10^{-5}	6.997×10^{-5}	0.6965
500	0.4565	1093	0.05572	1.117×10^{-4}	3.563×10^{-5}	7.806×10^{-5}	0.6986
600	0.4042	1115	0.06093	1.352×10^{-4}	3.846×10^{-5}	9.515×10^{-5}	0.7037
700	0.3627	1135	0.06581	1.598×10^{-4}	4.111×10^{-5}	1.133×10^{-4}	0.7092
800	0.3289	1153	0.07037	1.855×10^{-4}	4.362×10^{-5}	1.326×10^{-4}	0.7149
900	0.3008	1169	0.07465	2.122×10^{-4}	4.600×10^{-5}	1.529×10^{-4}	0.7206
1 000	0.2772	1184	0.07868	2.398×10^{-4}	4.826×10^{-5}	1.741×10^{-4}	0.7260
1 500	0.1990	1234	0.09599	3.908×10^{-4}	5.817×10^{-5}	2.922×10^{-4}	0.7478
2 000	0.1553	1264	0.11113	5.664×10^{-4}	6.630×10^{-5}	4.270×10^{-4}	0.7539

Nota: Para los gases ideales, las propiedades c_p , k , μ y Pr son independientes de la presión. Las propiedades ρ , ν y α a una presión P (en atm) diferente de 1 atm se determinan al multiplicar los valores de ρ , a la temperatura dada, por P y al dividir ν y α entre P .

Fuente: Datos generados basándose en el software EES desarrollado por S. A. Klein y F. L. Alvarado. Fuentes originales: Keenan, Chao, Keyes, Gas Tables, Wiley, 198, y Thermophysical Properties of Matter, Vol. 3: Thermal Conductivity, Y. S. Touloukian, P. E. Liley, S. C. Saxena, Vol. 11: Viscosity, Y. S. Touloukian, S. C. Saxena y P. Hestermans, IFI/Plenum, NY, ISBN 0-306067020-8.

Fuente: Cengel, Y. (2007). Transferencia de calor y masa. (3a ed.)

Anexo 10 Emisividad de los cuerpos

TABLA A-19

Propiedades relativas a la radiación solar de los materiales

Descripción/composición	Absortividad solar, α_s	Emisividad, ε , a 300 K	Relación, α_s/ε	Transmisividad solar, τ_s
Aluminio				
Pulido	0.09	0.03	3.0	
Anodizado	0.14	0.84	0.17	
Con capa adicional de cuarzo	0.11	0.37	0.30	
Hoja	0.15	0.05	3.0	
Ladrillo rojo (Purdue)	0.63	0.93	0.68	
Concreto	0.60	0.88	0.68	
Lámina metálica galvanizada				
Limpia, nueva	0.65	0.13	5.0	
Oxidada, con acción de la intemperie	0.80	0.28	2.9	
Vidrio, espesor de 3.2 mm				
Flotado o templado				0.79
Tipo al bajo óxido de hierro				0.88
Mármol, ligeramente blancuzco (no reflector)	0.40	0.88	0.45	
Metal, con chapa				
Sulfuro negro	0.92	0.10	9.2	
Óxido negro de cobalto	0.93	0.30	3.1	
Óxido negro de níquel	0.92	0.08	11	
Cromo negro	0.87	0.09	9.7	
Mylar, espesor de 0.13 mm				0.87
Pinturas				
Negra (Parsons)	0.98	0.98	1.0	
Blanca, acrílica	0.26	0.90	0.29	
Blanca, óxido de zinc	0.16	0.93	0.17	
Papel blanco	0.27	0.83	0.32	
Plexiglas, espesor de 3.2 mm				0.90
Porcelana, losetas de porcelana, blancas (superficie vidriada reflectora)	0.26	0.85	0.30	
Tejas para techo, rojo brillante				
Superficie seca	0.65	0.85	0.76	
Superficie mojada	0.88	0.91	0.96	
Arena seca				
Blancuzca	0.52	0.82	0.63	
Roja mate	0.73	0.86	0.82	
Nieve				
Partículas finas, recién caídas	0.13	0.82	0.16	
Gránulos de hielo	0.33	0.89	0.37	
Acero				
Acabado de espejo	0.41	0.05	8.2	
Intensamente herrumbroso	0.89	0.92	0.96	
Piedra (rosa claro)	0.65	0.87	0.74	
Tedlar, espesor de 0.10 mm				0.92
Teflón, espesor de 0.13 mm				0.92
Madera	0.59	0.90	0.66	

Fuente: V. C. Sharma y A. Sharma, "Solar Properties of Some Building Elements", *Energy* 14 (1989), págs. 805-810, y otras fuentes.

Fuente: Cengel, Y. (2007). Transferencia de calor y masa. (3a ed.)

Anexo 11 Propiedades del aislamiento

TABLA A-6

Propiedades de materiales aislantes
(a una temperatura media de 24°C)

Material	Espesor, L mm	Densidad, ρ kg/m ³	Conductividad térmica, k W/m · K	Calor específico, c_p kJ/kg · K	Valor R (para los espesores de la lista, L/k), K · m ² /W
Colcha y lámina					
Fibra mineral (forma fibrosa)	50 a 70 mm	4.8-32	—	0.71-0.96	1.23
procesada a partir de roca,	75 a 90 mm	4.8-32	—	0.71-0.96	1.94
escoria o vidrio)	135 a 165 mm	4.8-32	—	0.71-0.96	3.32
Tablero y losa					
Vidrio celular		136	0.055	1.0	—
Fibra de vidrio (ligamento orgánico)		64-144	0.036	0.96	—
Poliestireno expandido (bolitas moldeadas)		16	0.040	1.2	—
Poliuretano expandido (R -11 expandido)		24	0.023	1.6	—
Perlita expandida (ligamento orgánico)		16	0.052	1.26	—
Caucho expandido (rígido)		72	0.032	1.68	—
Fibra mineral con aglomerante de resina		240	0.042	0.71	—
Corcho		120	0.039	1.80	—
Rociado o formado en el sitio					
Espuma de poliuretano		24-40	0.023-0.026	—	—
Fibra de vidrio		56-72	0.038-0.039	—	—
Uretano, mezcla de dos partes (espuma rígida)		70	0.026	1.045	—
Gránulos de lana mineral con aglomerantes de asbesto/inorgánico (rociado)		190	0.046	—	—
Relleno flojo					
Fibra mineral (de roca, escoria o vidrio)	~ 75 a 125 mm	9.6-32	—	0.71	1.94
	~165 a 222 mm	9.6-32	—	0.71	3.35
	~191 a 254 mm	—	—	0.71	3.87
	~185 mm	—	—	0.71	5.28
Aerogel de sílice		122	0.025	—	—
Vermiculita (expandida)		122	0.068	—	—
Perlita (expandida)		32-66	0.039-0.045	1.09	—
Aserrín o virutas		128-240	0.065	1.38	—
Aislamiento celulósico (papel molido o pulpa de madera)		37-51	0.039-0.046	—	—
Aislamiento para techo					
Vidrio celular	—	144	0.058	1.0	—
Preformado, para usarse arriba del tablero	13 mm	—	—	1.0	0.24
	25 mm	—	—	2.1	0.49
	50 mm	—	—	3.9	0.93
Aislamiento reflector					
Polvo sílice (al vacío)		160	0.0017	—	—
Hoja de aluminio separando colchones de vidrio esponjoso; 10 a 12 capas (al vacío); para aplicaciones criogénicas (150 K)		40	0.00016	—	—
Hoja de aluminio y laminado de vidrio y papel; 75 a 150 capas; para aplicaciones criogénicas (150 K)		120	0.000017	—	—

Fuente: Cengel, Y. (2007). Transferencia de calor y masa. (3a ed.)

Anexo 12 Tabla de los valores críticos de la distribución de chi-cuadrado

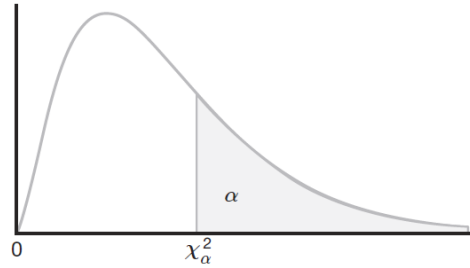


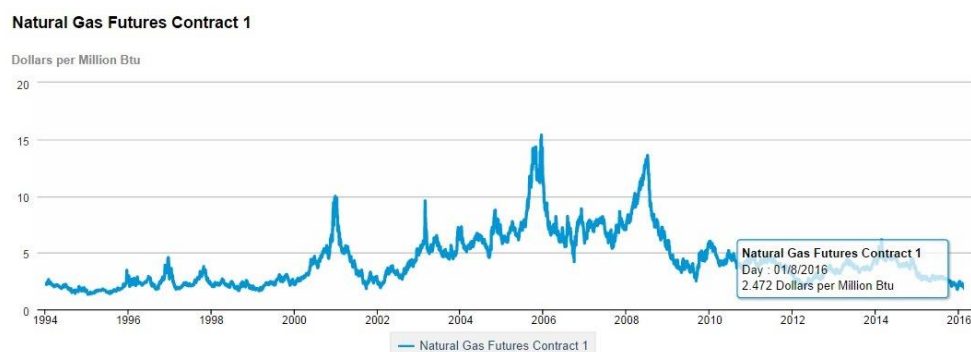
Tabla A.5 Valores críticos de la distribución chi cuadrada

ν	α									
	0.995	0.99	0.98	0.975	0.95	0.90	0.80	0.75	0.70	0.50
1	0.0393	0.0157	0.03628	0.03982	0.00393	0.0158	0.0642	0.102	0.148	0.455
2	0.0100	0.0201	0.0404	0.0506	0.103	0.211	0.446	0.575	0.713	1.386
3	0.0717	0.115	0.185	0.216	0.352	0.584	1.005	1.213	1.424	2.366
4	0.207	0.297	0.429	0.484	0.711	1.064	1.649	1.923	2.195	3.357
5	0.412	0.554	0.752	0.831	1.145	1.610	2.343	2.675	3.000	4.351
6	0.676	0.872	1.134	1.237	1.635	2.204	3.070	3.455	3.828	5.348
7	0.989	1.239	1.564	1.690	2.167	2.833	3.822	4.255	4.671	6.346
8	1.344	1.647	2.032	2.180	2.733	3.490	4.594	5.071	5.527	7.344
9	1.735	2.088	2.532	2.700	3.325	4.168	5.380	5.899	6.393	8.343
10	2.156	2.558	3.059	3.247	3.940	4.865	6.179	6.737	7.267	9.342
11	2.603	3.053	3.609	3.816	4.575	5.578	6.989	7.584	8.148	10.341
12	3.074	3.571	4.178	4.404	5.226	6.304	7.807	8.438	9.034	11.340
13	3.565	4.107	4.765	5.009	5.892	7.041	8.634	9.299	9.926	12.340
14	4.075	4.660	5.368	5.629	6.571	7.790	9.467	10.165	10.821	13.339
15	4.601	5.229	5.985	6.262	7.261	8.547	10.307	11.037	11.721	14.339
16	5.142	5.812	6.614	6.908	7.962	9.312	11.152	11.912	12.624	15.338
17	5.697	6.408	7.255	7.564	8.672	10.085	12.002	12.792	13.531	16.338
18	6.265	7.015	7.906	8.231	9.390	10.865	12.857	13.675	14.440	17.338
19	6.844	7.633	8.567	8.907	10.117	11.651	13.716	14.562	15.352	18.338
20	7.434	8.260	9.237	9.591	10.851	12.443	14.578	15.452	16.266	19.337
21	8.034	8.897	9.915	10.283	11.591	13.240	15.445	16.344	17.182	20.337
22	8.643	9.542	10.600	10.982	12.338	14.041	16.314	17.240	18.101	21.337
23	9.260	10.196	11.293	11.689	13.091	14.848	17.187	18.137	19.021	22.337
24	9.886	10.856	11.992	12.401	13.848	15.659	18.062	19.037	19.943	23.337
25	10.520	11.524	12.697	13.120	14.611	16.473	18.940	19.939	20.867	24.337
26	11.160	12.198	13.409	13.844	15.379	17.292	19.820	20.843	21.792	25.336
27	11.808	12.878	14.125	14.573	16.151	18.114	20.703	21.749	22.719	26.336
28	12.461	13.565	14.847	15.308	16.928	18.939	21.588	22.657	23.647	27.336
29	13.121	14.256	15.574	16.047	17.708	19.768	22.475	23.567	24.577	28.336
30	13.787	14.953	16.306	16.791	18.493	20.599	23.364	24.478	25.508	29.336
40	20.707	22.164	23.838	24.433	26.509	29.051	32.345	33.66	34.872	39.335
50	27.991	29.707	31.664	32.357	34.764	37.689	41.449	42.942	44.313	49.335
60	35.534	37.485	39.699	40.482	43.188	46.459	50.641	52.294	53.809	59.335

ν	α									
	0.30	0.25	0.20	0.10	0.05	0.025	0.02	0.01	0.005	0.001
1	1.074	1.323	1.642	2.706	3.841	5.024	5.412	6.635	7.879	10.827
2	2.408	2.773	3.219	4.605	5.991	7.378	7.824	9.210	10.597	13.815
3	3.665	4.108	4.642	6.251	7.815	9.348	9.837	11.345	12.838	16.266
4	4.878	5.385	5.989	7.779	9.488	11.143	11.668	13.277	14.860	18.466
5	6.064	6.626	7.289	9.236	11.070	12.832	13.388	15.086	16.750	20.515
6	7.231	7.841	8.558	10.645	12.592	14.449	15.033	16.812	18.548	22.457
7	8.383	9.037	9.803	12.017	14.067	16.013	16.622	18.475	20.278	24.321
8	9.524	10.219	11.030	13.362	15.507	17.535	18.168	20.090	21.955	26.124
9	10.656	11.389	12.242	14.684	16.919	19.023	19.679	21.666	23.589	27.877
10	11.781	12.549	13.442	15.987	18.307	20.483	21.161	23.209	25.188	29.588
11	12.899	13.701	14.631	17.275	19.675	21.920	22.618	24.725	26.757	31.264
12	14.011	14.845	15.812	18.549	21.026	23.337	24.054	26.217	28.300	32.909
13	15.119	15.984	16.985	19.812	22.362	24.736	25.471	27.688	29.819	34.527
14	16.222	17.117	18.151	21.064	23.685	26.119	26.873	29.141	31.319	36.124
15	17.322	18.245	19.311	22.307	24.996	27.488	28.259	30.578	32.801	37.698
16	18.418	19.369	20.465	23.542	26.296	28.845	29.633	32.000	34.267	39.252
17	19.511	20.489	21.615	24.769	27.587	30.191	30.995	33.409	35.718	40.791
18	20.601	21.605	22.760	25.989	28.869	31.526	32.346	34.805	37.156	42.312
19	21.689	22.718	23.900	27.204	30.144	32.852	33.687	36.191	38.582	43.819
20	22.775	23.828	25.038	28.412	31.410	34.170	35.020	37.566	39.997	45.314
21	23.858	24.935	26.171	29.615	32.671	35.479	36.343	38.932	41.401	46.796
22	24.939	26.039	27.301	30.813	33.924	36.781	37.659	40.289	42.796	48.268
23	26.018	27.141	28.429	32.007	35.172	38.076	38.968	41.638	44.181	49.728
24	27.096	28.241	29.553	33.196	36.415	39.364	40.270	42.980	45.558	51.179
25	28.172	29.339	30.675	34.382	37.652	40.646	41.566	44.314	46.928	52.619
26	29.246	30.435	31.795	35.563	38.885	41.923	42.856	45.642	48.290	54.051
27	30.319	31.528	32.912	36.741	40.113	43.195	44.140	46.963	49.645	55.475
28	31.391	32.620	34.027	37.916	41.337	44.461	45.419	48.278	50.994	56.892
29	32.461	33.711	35.139	39.087	42.557	45.722	46.693	49.588	52.335	58.301
30	33.530	34.800	36.250	40.256	43.773	46.979	47.962	50.892	53.672	59.702
40	44.165	45.616	47.269	51.805	55.758	59.342	60.436	63.691	66.766	73.403
50	54.723	56.334	58.164	63.167	67.505	71.420	72.613	76.154	79.490	86.660
60	65.226	66.981	68.972	74.397	79.082	83.298	84.58	88.379	91.952	99.608

Fuente: Walpole, *et al.* (2012). Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias

Anexo 13 Precio del gas natural a nivel internacional



Fuente: Energy Information Administration (EIA)

Precio gas: 2,472 Dólares por millón de Btu (consultado 8 de enero 2016)

Anexo 14 Cotización analizador de gases en línea



Srs.: Ing. Galo Paredes	PROFORMA
ATT.:	5611-16
CIUDAD:	FONO: ext.
FECHA: 08 de Marzo del 2016	

ITEM	CANTIDAD	DESCRIPCION	Precio Unitario	TOTAL
1	1	base Slate	1,850.00	1,850.00
2	1	control quemador	1,680.00	1,680.00
3	1	modulo amplificador de llama	2,050.00	2,050.00
4	1	limite de control	2,500.00	2,500.00
5	1	modulo analógico	3,800.00	3,800.00
6	1	módulo digital	1,500.00	1,500.00
7	1	soporte riel din	150.00	150.00
8	1	potenciometro	560.00	560.00
9	1	interruptores de la red	300.00	300.00
10	1	flue air ratio (con celda de oxigeno)	10,500.00	10,500.00
11	1	touch screen	3,500.00	3,500.00
SUBTOTAL				28,390.00
% IVA			12	3,406.80
TOTAL				31,796.80

CONDICIONES DE PAGO : orden de compra por escrito

TIEMPO ENTREGA : 10 a 12 semanas

VALIDO POR : 8 DIAS


 Luis j morales d.
 Division Industrial

Anexo 16 Validación de la propuesta



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
DIRECCIÓN DE POSTGRADOS

ANEXO 1

Shushufindi abril 27, 2016.

MSc.
Jorge Espinoza M.
COORDINADOR DE OPERACIONES
EP PETROECUADOR
Presente

De mi consideración:

A través del presente expreso un cordial y efusivo saludo, a la vez; conocedor de su alta capacidad profesional investigativa, me permito solicitar de la manera más comedida, su valiosa colaboración en la **VALIDACIÓN DE LA PROPUESTA** como un mecanismo a la solución del problema planteado en el siguiente tema de investigación: **EVALUACIÓN DE LOS PARÁMETROS OPERACIONALES DE LA CALDERA PIROTUBULAR YB701C UBICADA EN LA REFINERÍA SHUSHUFINDI DE LA EP PETROECUADOR, Y SU INFLUENCIA EN EL CONSUMO DE COMBUSTIBLE, EN EL AÑO 2015. DISEÑO DE UNA PROPUESTA QUE PERMITA MEJORAR LA EFICIENCIA ENERGÉTICA.**

Mucho agradeceré seguir las instrucciones que se anexan al presente.

Por la atención favorable al presente, anticipo mis más sinceros agradecimientos de alta consideración y estima.

Atentamente,

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Gale Atejandro Paredes Fajardo', enclosed within a large, loopy blue scribble.

Ing. Gale Atejandro Paredes Fajardo
RESPONSABLE TESISISTA



ANEXO 2

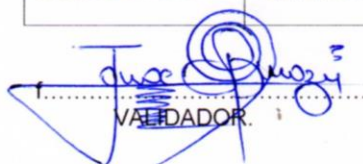
INSTRUMENTO DE VALIDACIÓN DE LA PROPUESTA

TÍTULO DE LA PROPUESTA: EVALUACIÓN DE LOS PARÁMETROS OPERACIONALES DE LA CALDERA PIROTUBULAR YB701C UBICADA EN LA REFINERÍA SHUSHUFINDI DE LA EP PETROECUADOR, Y SU INFLUENCIA EN EL CONSUMO DE COMBUSTIBLE, EN EL AÑO 2015. DISEÑO DE UNA PROPUESTA QUE PERMITA MEJORAR LA EFICIENCIA ENERGÉTICA

3 = MUY SATISFACTORIO	2 = SATISFACTORIO	1 = POCO SATISFACTORIO
-----------------------	-------------------	------------------------

ASPECTOS	3	2	1	OBSERVACIONES
1. EL TEMA: <ul style="list-style-type: none">Identificación de la propuesta.Originalidad.Impacto.	3			
2. OBJETIVO: <ul style="list-style-type: none">Determinación clara y concisa.Factibilidad.Utilidad.	3			
3. JUSTIFICACIÓN: <ul style="list-style-type: none">Contribuye a mejorar la organización.Contribuye un aporte para la institución o empresa.	3			
4. FUNDAMENTACIÓN TEORICA: <ul style="list-style-type: none">Se fundamenta en teorías científicas contemporáneas.Los conceptos son de fácil comprensión.Utiliza terminología básica y específica.	3			
5. DESCRIPCIÓN DE LA PROPUESTA: <ul style="list-style-type: none">Presenta un orden lógico.Tiene coherencia entre sí los componentes de la propuesta.Se ajusta a la realidad del contexto social.Es sugestivo e interesante.Es de fácil manejo.	2			
TOTAL:	14			

VALIDADO POR:	Jorge Espinoza Mejía		
Área de Trabajo. Operaciones	Título Profesional. Magíster en Ingeniería del Gas del Petróleo	Cargo u Ocupación. Coordinador de Operaciones	Año de Experiencia. 10 años
Observaciones:			
Fecha: 27-04-2016	Telf.: 09-98128433	Dirección del Trabajo: Refinería Shushufindi	C.I: 1002433827


VALIDADOR.



ANEXO 1

Shushufindi abril 27, 2016.

MSc.
Gabriela López B.
SUPERVISORA DE GESTIÓN AMBIENTAL
EP PETROECUADOR
Presente

De mi consideración:

A través del presente expreso un cordial y efusivo saludo, a la vez; conocedor de su alta capacidad profesional investigativa, me permito solicitar de la manera más comedida, su valiosa colaboración en la **VALIDACIÓN DE LA PROPUESTA** como un mecanismo a la solución del problema planteado en el siguiente tema de investigación: **EVALUACIÓN DE LOS PARÁMETROS OPERACIONALES DE LA CALDERA PIROTUBULAR YB701C UBICADA EN LA REFINERÍA SHUSHUFINDI DE LA EP PETROECUADOR, Y SU INFLUENCIA EN EL CONSUMO DE COMBUSTIBLE, EN EL AÑO 2015. DISEÑO DE UNA PROPUESTA QUE PERMITA MEJORAR LA EFICIENCIA ENERGÉTICA.**

Mucho agradeceré seguir las instrucciones que se anexan al presente.

Por la atención favorable al presente, anticipo mis más sinceros agradecimientos de alta consideración y estima.

Atentamente,

Ing. Galo Alejandro Paredes Fajardo
RESPONSABLE TESISTA



ANEXO 2


INSTRUMENTO DE VALIDACIÓN DE LA PROPUESTA

TÍTULO DE LA PROPUESTA: EVALUACIÓN DE LOS PARÁMETROS OPERACIONALES DE LA CALDERA PIROTUBULAR YB701C UBICADA EN LA REFINERÍA SHUSHUFINDI DE LA EP PETROECUADOR, Y SU INFLUENCIA EN EL CONSUMO DE COMBUSTIBLE, EN EL AÑO 2015. DISEÑO DE UNA PROPUESTA QUE PERMITA MEJORAR LA EFICIENCIA ENERGÉTICA

3 = MUY SATISFACTORIO	2 = SATISFACTORIO	1 = POCO SATISFACTORIO
-----------------------	-------------------	------------------------

ASPECTOS	3	2	1	OBSERVACIONES
1. EL TEMA: <ul style="list-style-type: none">Identificación de la propuesta.Originalidad.Impacto.	3			
2. OBJETIVO: <ul style="list-style-type: none">Determinación clara y concisa.Factibilidad.Utilidad.	3			
3. JUSTIFICACIÓN: <ul style="list-style-type: none">Contribuye a mejorar la organización.Contribuye un aporte para la institución o empresa.	3			
4. FUNDAMENTACIÓN TEORICA: <ul style="list-style-type: none">Se fundamenta en teorías científicas contemporáneas.Los conceptos son de fácil comprensión.Utiliza terminología básica y específica.	3			
5. DESCRIPCIÓN DE LA PROPUESTA: <ul style="list-style-type: none">Presenta un orden lógico.Tiene coherencia entre si los componentes de la propuesta.Se ajusta a la realidad del contexto social.Es sugestivo e interesante.Es de fácil manejo.	3			
TOTAL:	15			

VALIDADO POR:	Gabriela Alejandra López Bravo		
Área de Trabajo.	Título Profesional.	Cargo u Ocupación.	Año de Experiencia.
Seguridad y Ambiente	Magister en Calidad, Seguridad y Ambiente	Supervisora de Gestión Ambiental	10 años
Observaciones:			
Fecha: 27-04-2016	Tel.: 09-92753001	Dirección del Trabajo: Refinería Shushufindi	C.I: 1716946783

f. 
VALIDADOR.



ANEXO 1

Shushufindi abril 27, 2016.

MSc.
Jorge Damián C.
INSPECTOR DE PLANTAS
EP PETROECUADOR
Presente


De mi consideración:

A través del presente expreso un cordial y efusivo saludo, a la vez; conocedor de su alta capacidad profesional investigativa, me permito solicitar de la manera más comedida, su valiosa colaboración en la **VALIDACIÓN DE LA PROPUESTA** como un mecanismo a la solución del problema planteado en el siguiente tema de investigación: **EVALUACIÓN DE LOS PARÁMETROS OPERACIONALES DE LA CALDERA PIROTUBULAR YB701C UBICADA EN LA REFINERÍA SHUSHUFINDI DE LA EP PETROECUADOR, Y SU INFLUENCIA EN EL CONSUMO DE COMBUSTIBLE, EN EL AÑO 2015. DISEÑO DE UNA PROPUESTA QUE PERMITA MEJORAR LA EFICIENCIA ENERGÉTICA.**

Mucho agradeceré seguir las instrucciones que se anexan al presente.

Por la atención favorable al presente, anticipo mis más sinceros agradecimientos de alta consideración y estima.

Atentamente,



Ing. Galo Alejandro Paredes Fajardo
RESPONSABLE TESISTA



ANEXO 2


INSTRUMENTO DE VALIDACIÓN DE LA PROPUESTA

TÍTULO DE LA PROPUESTA: EVALUACIÓN DE LOS PARÁMETROS OPERACIONALES DE LA CALDERA PIROTUBULAR YB701C UBICADA EN LA REFINERÍA SHUSHUFINDI DE LA EP PETROECUADOR, Y SU INFLUENCIA EN EL CONSUMO DE COMBUSTIBLE, EN EL AÑO 2015. DISEÑO DE UNA PROPUESTA QUE PERMITA MEJORAR LA EFICIENCIA ENERGÉTICA

3 = MUY SATISFACTORIO 2 = SATISFACTORIO 1 = POCO SATISFACTORIO

ASPECTOS	3	2	1	OBSERVACIONES
1. EL TEMA: <ul style="list-style-type: none">Identificación de la propuesta.Originalidad.Impacto.	3			
2. OBJETIVO: <ul style="list-style-type: none">Determinación clara y concisa.Factibilidad.Utilidad.	3			
3. JUSTIFICACIÓN: <ul style="list-style-type: none">Contribuye a mejorar la organización.Contribuye un aporte para la institución o empresa.	3			
4. FUNDAMENTACIÓN TEORICA: <ul style="list-style-type: none">Se fundamenta en teorías científicas contemporáneas.Los conceptos son de fácil comprensión.Utiliza terminología básica y específica.	3			
5. DESCRIPCIÓN DE LA PROPUESTA: <ul style="list-style-type: none">Presenta un orden lógico.Tiene coherencia entre si los componentes de la propuesta.Se ajusta a la realidad del contexto social.Es sugestivo e interesante.Es de fácil manejo.	3			
TOTAL:	15			

VALIDADO POR:	Jorge Damián Cabadiana		
Área de Trabajo. Apoyo Técnico de la Producción	Título Profesional. Magister Gestión Energías	Cargo u Ocupación. Inspector de Planta	Año de Experiencia. 10 años
Observaciones:			
Fecha: 27-04-2016	Telf.: 09.92631844	Dirección del Trabajo: Refinería Shushufindi	C.I.: 0602762890

f. 
VALIDADOR.

Anexo 17 Validación de los instrumentos



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
DIRECCIÓN DE POSTGRADOS

ANEXO 1

Quito abril 27, 2016.

MCs.
Jorge Espinoza M.
COORDINADOR DE OPERACIONES
EP PETROECUADOR
Presente

De mi consideración:

A través del presente expreso un cordial y efusivo saludo, a la vez; conocedor de su alta capacidad profesional, me permito solicitar de la manera más comedida, su valiosa colaboración en la **VALIDACIÓN DEL INSTRUMENTO** a utilizarse en la recolección de datos para mi investigación sobre “EVALUACIÓN DE LOS PARÁMETROS OPERACIONALES DE LA CALDERA PIROTUBULAR YB701C UBICADA EN LA REFINERÍA SHUSHUFINDI DE LA EP PETROECUADOR, Y SU INFLUENCIA EN EL CONSUMO DE COMBUSTIBLE, EN EL AÑO 2015. DISEÑO DE UNA PROPUESTA QUE PERMITA MEJORAR LA EFICIENCIA ENERGÉTICA”

Mucho agradeceré seguir las instrucciones que se anexan al presente: matriz de operacionalización de variables, los objetivos, instrumentos y los formularios.

Por la atención favorable al presente, anticipo mis más sinceros agradecimientos de alta consideración y estima.

Atentamente,

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Galo Paredes', enclosed in a blue oval.

Ing. Galo Alejandro Paredes Fajardo
RESPONSABLE DE LA INVESTIGACIÓN



ANEXO 2

INSTRUCCIONES PARA VALIDACIÓN

INSTRUCCIONES PARA LA VALIDACIÓN DE CONTENIDO DEL INSTRUMENTO SOBRE:

EVALUACIÓN DE LOS PARÁMETROS OPERACIONALES DE LA CALDERA PIROTUBULAR YB701C UBICADA EN LA REFINERÍA SHUSHUFINDI DE LA EP PETROECUADOR, Y SU INFLUENCIA EN EL CONSUMO DE COMBUSTIBLE. EN EL AÑO 2015. DISEÑO DE UNA PROPUESTA QUE PERMITA MEJORAR LA EFICIENCIA ENERGÉTICA

Lea detenidamente los objetivos, la matriz de operacionalización de variables y el cuestionario de opinión.

1. Concluir acerca de la pertinencia entre objetivos, variables, e indicadores con los ítems del instrumento.
2. Determinar la calidad técnica de cada ítem, así como la adecuación de éstos a nivel cultural, social y educativo de la población a la que está dirigido el instrumento.
3. Consignar las observaciones en el espacio correspondiente.
4. Realizar la misma actividad para cada uno de los ítems, utilizando las siguientes categorías.

A. Correspondencia de las preguntas del instrumento con los objetivos, variables, dimensiones, indicadores e ítems.

P PERTINENCIA
NP NO PERTINENCIA

En caso de marcar **NP**, por favor pase al espacio de observaciones y justifique su opinión.

B. Calidad técnica y representatividad

Marque en la casilla correspondiente:

O ÓPTIMA
B BUENA
R REGULAR
D DEFICIENTE

En caso de marcar **R** o **D**, por favor justifique su opinión en el espacio de observaciones.

C. Lenguaje

Marque en la casilla correspondiente:

A ADECUADO
I INADECUADO

En caso de marcar **I**, por favor justifique su opinión en el espacio de observaciones



ANEXO 3

OBJETIVOS DEL INSTRUMENTO PARA LA FASE DE DIAGNÓSTICO

Objetivo General

- ✓ Evaluar la incidencia de los parámetros operacionales de la caldera pirotubular YB701C, de la Refinería Shushufindi, en el consumo de combustible y la eficiencia energética del proceso, durante el año 2015.

Objetivos específicos

- ✓ Determinar las limitaciones de los trabajos precedentes relacionados con los procesos de eficiencia energética en calderas y sus particularidades al ser aplicadas al objeto de estudio.
- ✓ Establecer un procedimiento que permita la evaluación de los principales indicadores de eficiencia en calderas pirotubulares, su incidencia en el consumo específico de combustible y la generación de vapor.
- ✓ Valorar de forma económica y ambiental el proceso de producción de vapor en calderas pirotubulares y propuesta de acciones que permita mejorar la eficiencia energética de la misma.



ANEXO 4

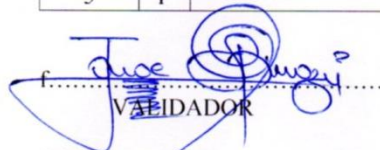
MATRIZ DE OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

VARIABLE	DIMENSIONES	INDICADORES	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS	ÍTEMS
Independiente Portadores energéticos	m ³ /h	Consumo promedio de gas natural	Medición / Flujómetro	1
	m ³ /h	Consumo promedio de agua	Medición / Medidor de nivel	2
Dependiente Rendimiento del generador de vapor.	kWh	Consumo de energía.	Medición / Multímetro Pinza amperimétrica	3
	kJ/kg	Pérdidas de calor	Cálculos / Ecuaciones	4
	Ppm	Contaminación ambiental	Medición / Analizador de gases	5

ANEXO 5

RELACIÓN ENTRE VARIABLES, DIMENSIONES, INDICADORES E ÍTEMS

RELACIÓN ENTRE VARIABLES, DIMENSIONES, INDICADORES E ÍTEMS		
P = PERTINENTE NP = NO PERTINENTE		
ÍTEMS	A	OBSERVACIONES
1	P	
2	P	
3	P	
4	P	
5	P	


VALIDADOR

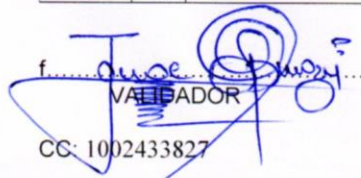
CC: 1002433827



ANEXO 6

CALIDAD TÉCNICA Y REPRESENTATIVIDAD

CALIDAD TÉCNICA Y REPRESENTATIVIDAD				
O= OPTIMA		B= BUENA	R= REGULAR	D= DEFICIENTE
ITEMS	B	OBSERVACIONES		
1	B			
2	B			
3	O			
4	B			
5	O			

f. 
VALIDADOR
CC: 1002433827

ANEXO 7

LENGUAJE

LENGUAJE		
A= ADECUADO		I= INADECUADO
ITEMS	C	OBSERVACIONES
1	A	
2	A	
3	A	
4	A	
5	A	

f. 
VALIDADOR
CC: 1002433827



ANEXO 1

Quito abril 27, 2016.

MCs.
Gabriela López B.
SUPERVISORA GESTIÓN AMBIENTAL
EP PETROECUADOR
Presente

De mi consideración:

A través del presente expreso un cordial y efusivo saludo, a la vez; conocedor de su alta capacidad profesional, me permito solicitar de la manera más comedida, su valiosa colaboración en la **VALIDACIÓN DEL INSTRUMENTO** a utilizarse en la recolección de datos para mi investigación sobre “EVALUACIÓN DE LOS PARÁMETROS OPERACIONALES DE LA CALDERA PIROTUBULAR YB701C UBICADA EN LA REFINERÍA SHUSHUFINDI DE LA EP PETROECUADOR, Y SU INFLUENCIA EN EL CONSUMO DE COMBUSTIBLE, EN EL AÑO 2015. DISEÑO DE UNA PROPUESTA QUE PERMITA MEJORAR LA EFICIENCIA ENERGÉTICA”

Mucho agradeceré seguir las instrucciones que se anexan al presente: matriz de operacionalización de variables, los objetivos, instrumentos y los formularios.

Por la atención favorable al presente, anticipo mis más sinceros agradecimientos de alta consideración y estima.

Atentamente,

Ing. Gato Alejandro Paredes Fajardo
RESPONSABLE DE LA INVESTIGACIÓN



ANEXO 2

INSTRUCCIONES PARA VALIDACIÓN

INSTRUCCIONES PARA LA VALIDACIÓN DE CONTENIDO DEL INSTRUMENTO SOBRE:

EVALUACIÓN DE LOS PARÁMETROS OPERACIONALES DE LA CALDERA PIROTUBULAR YB701C UBICADA EN LA REFINERÍA SHUSHUFINDI DE LA EP PETROECUADOR, Y SU INFLUENCIA EN EL CONSUMO DE COMBUSTIBLE. EN EL AÑO 2015. DISEÑO DE UNA PROPUESTA QUE PERMITA MEJORAR LA EFICIENCIA ENERGÉTICA

Lea detenidamente los objetivos, la matriz de operacionalización de variables y el cuestionario de opinión.

1. Concluir acerca de la pertinencia entre objetivos, variables, e indicadores con los ítems del instrumento.
2. Determinar la calidad técnica de cada ítem, así como la adecuación de éstos a nivel cultural, social y educativo de la población a la que está dirigido el instrumento.
3. Consignar las observaciones en el espacio correspondiente.
4. Realizar la misma actividad para cada uno de los ítems, utilizando las siguientes categorías.

A. Correspondencia de las preguntas del instrumento con los objetivos, variables, dimensiones, indicadores e ítems.

P PERTINENCIA
NP NO PERTINENCIA

En caso de marcar **NP**, por favor pase al espacio de observaciones y justifique su opinión.

B. Calidad técnica y representatividad

Marque en la casilla correspondiente:

O ÓPTIMA
B BUENA
R REGULAR
D DEFICIENTE

En caso de marcar **R** o **D**, por favor justifique su opinión en el espacio de observaciones.

C. Lenguaje

Marque en la casilla correspondiente:

A ADECUADO
I INADECUADO

En caso de marcar **I**, por favor justifique su opinión en el espacio de observaciones



ANEXO 3

OBJETIVOS DEL INSTRUMENTO PARA LA FASE DE DIAGNÓSTICO

Objetivo General

- ✓ Evaluar la incidencia de los parámetros operacionales de la caldera pirotubular YB701C, de la Refinería Shushufindi, en el consumo de combustible y la eficiencia energética del proceso, durante el año 2015.

Objetivos específicos

- ✓ Determinar las limitaciones de los trabajos precedentes relacionados con los procesos de eficiencia energética en calderas y sus particularidades al ser aplicadas al objeto de estudio.
- ✓ Establecer un procedimiento que permita la evaluación de los principales indicadores de eficiencia en calderas pirotubulares, su incidencia en el consumo específico de combustible y la generación de vapor.
- ✓ Valorar de forma económica y ambiental el proceso de producción de vapor en calderas pirotubulares y propuesta de acciones que permita mejorar la eficiencia energética de la misma.



ANEXO 4

MATRIZ DE OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

VARIABLE	DIMENSIONES	INDICADORES	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS	ÍTEMS
Independiente Portadores energéticos	m ³ /h	Consumo promedio de gas natural	Medición / Flujómetro	1
	m ³ /h	Consumo promedio de agua	Medición / Medidor de nivel	2
Dependiente Rendimiento del generador de vapor.	kWh	Consumo de energía.	Medición / Multímetro Pinza amperimétrica	3
	kJ/kg	Pérdidas de calor	Cálculos / Ecuaciones	4
	Ppm	Contaminación ambiental	Medición / Analizador de gases	5

ANEXO 5

RELACIÓN ENTRE VARIABLES, DIMENSIONES, INDICADORES E ÍTEMS

RELACIÓN ENTRE VARIABLES, DIMENSIONES, INDICADORES E ÍTEMS		
P = PERTINENTE NP = NO PERTINENTE		
ÍTEMS	A	OBSERVACIONES
1	P	
2	P	
3	P	
4	P	
5	P	

f. 
VALIDADOR

CC: 1716946783



ANEXO 6

CALIDAD TÉCNICA Y REPRESENTATIVIDAD

CALIDAD TÉCNICA Y REPRESENTATIVIDAD			
O= OPTIMA	B= BUENA	R= REGULAR	D= DEFICIENTE
ITEMS	B	OBSERVACIONES	
1	B		
2	B		
3	O		
4	O		
5	O		

f. 
VALIDADOR

CC: 1716946783

ANEXO 7

LENGUAJE

LENGUAJE		
A= ADECUADO	I= INADECUADO	
ITEMS	C	OBSERVACIONES
1	A	
2	A	
3	A	
4	A	
5	A	

f. 
VALIDADOR

CC: 1716946783



ANEXO 1

Shushufindi abril 27, 2016.

MSc.
Jorge Damián C.
INSPECTOR DE PLANTAS
EP PETROECUADOR
Presente

De mi consideración:

A través del presente expreso un cordial y efusivo saludo, a la vez; conecedor de su alta capacidad profesional, me permito solicitar de la manera más comedida, su valiosa colaboración en la **VALIDACIÓN DEL INSTRUMENTO** a utilizarse en la recolección de datos para mi investigación sobre “EVALUACIÓN DE LOS PARÁMETROS OPERACIONALES DE LA CALDERA PIROTUBULAR YB701C UBICADA EN LA REFINERÍA SHUSHUFINDI DE LA EP PETROECUADOR, Y SU INFLUENCIA EN EL CONSUMO DE COMBUSTIBLE, EN EL AÑO 2015. DISEÑO DE UNA PROPUESTA QUE PERMITA MEJORAR LA EFICIENCIA ENERGÉTICA”

Mucho agradeceré seguir las instrucciones que se anexan al presente: matriz de operacionalización de variables, los objetivos, instrumentos y los formularios.

Por la atención favorable al presente, anticipo mis más sinceros agradecimientos de alta consideración y estima.

Atentamente,

Ing. Galo Alejandro Paredes Fajardo
RESPONSABLE DE LA INVESTIGACIÓN



ANEXO 2

INSTRUCCIONES PARA VALIDACIÓN

INSTRUCCIONES PARA LA VALIDACIÓN DE CONTENIDO DEL INSTRUMENTO SOBRE:

EVALUACIÓN DE LOS PARÁMETROS OPERACIONALES DE LA CALDERA PIROTUBULAR YB701C UBICADA EN LA REFINERÍA SHUSHUFINDI DE LA EP PETROECUADOR, Y SU INFLUENCIA EN EL CONSUMO DE COMBUSTIBLE. EN EL AÑO 2015. DISEÑO DE UNA PROPUESTA QUE PERMITA MEJORAR LA EFICIENCIA ENERGÉTICA

Lea detenidamente los objetivos, la matriz de operacionalización de variables y el cuestionario de opinión.

1. Concluir acerca de la pertinencia entre objetivos, variables, e indicadores con los ítems del instrumento.
2. Determinar la calidad técnica de cada ítem, así como la adecuación de éstos a nivel cultural, social y educativo de la población a la que está dirigido el instrumento.
3. Consignar las observaciones en el espacio correspondiente.
4. Realizar la misma actividad para cada uno de los ítems, utilizando las siguientes categorías.

A. Correspondencia de las preguntas del instrumento con los objetivos, variables, dimensiones, indicadores e ítems.

P PERTINENCIA
NP NO PERTINENCIA

En caso de marcar **NP**, por favor pase al espacio de observaciones y justifique su opinión.

B. Calidad técnica y representatividad

Marque en la casilla correspondiente:

O ÓPTIMA
B BUENA
R REGULAR
D DEFICIENTE

En caso de marcar **R** o **D**, por favor justifique su opinión en el espacio de observaciones.

C. Lenguaje

Marque en la casilla correspondiente:

A ADECUADO
I INADECUADO

En caso de marcar **I**, por favor justifique su opinión en el espacio de observaciones



ANEXO 3

OBJETIVOS DEL INSTRUMENTO PARA LA FASE DE DIAGNÓSTICO

Objetivo General

- ✓ Evaluar la incidencia de los parámetros operacionales de la caldera pirotubular YB701C, de la Refinería Shushufindi, en el consumo de combustible y la eficiencia energética del proceso, durante el año 2015.

Objetivos específicos

- ✓ Determinar las limitaciones de los trabajos precedentes relacionados con los procesos de eficiencia energética en calderas y sus particularidades al ser aplicadas al objeto de estudio.
- ✓ Establecer un procedimiento que permita la evaluación de los principales indicadores de eficiencia en calderas pirotubulares, su incidencia en el consumo específico de combustible y la generación de vapor.
- ✓ Valorar de forma económica y ambiental el proceso de producción de vapor en calderas pirotubulares y propuesta de acciones que permita mejorar la eficiencia energética de la misma.



ANEXO 4


MATRIZ DE OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

VARIABLE	DIMENSIONES	INDICADORES	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS	ÍTEMS
Independiente Portadores energéticos	m ³ /h	Consumo promedio de gas natural	Medición / Flujómetro	1
	m ³ /h	Consumo promedio de agua	Medición / Medidor de nivel	2
Dependiente Rendimiento del generador de vapor.	kWh	Consumo de energía.	Medición / Multímetro Pinza amperimétrica	3
	kJ/kg	Pérdidas de calor	Cálculos / Ecuaciones	4
	Ppm	Contaminación ambiental	Medición / Analizador de gases	5

ANEXO 5

RELACIÓN ENTRE VARIABLES, DIMENSIONES, INDICADORES E ÍTEMS

RELACIÓN ENTRE VARIABLES, DIMENSIONES, INDICADORES E ÍTEMS		
P = PERTINENTE		
NP = NO PERTINENTE		
ÍTEMS	A	OBSERVACIONES
1	P	
2	P	
3	P	
4	P	
5	P	

f. 
VALIDADOR

CC: 0602762890



ANEXO 6

CALIDAD TÉCNICA Y REPRESENTATIVIDAD

CALIDAD TÉCNICA Y REPRESENTATIVIDAD				
O= OPTIMA		B= BUENA	R= REGULAR	D= DEFICIENTE
ITEMS	B	OBSERVACIONES		
1	B			
2	O			
3	O			
4	O			
5	O			

f.....
VALIDADOR

CC: 0602762890

ANEXO 7

LENGUAJE

LENGUAJE		
A= ADECUADO		I= INADECUADO
ITEMS	C	OBSERVACIONES
1	A	
2	A	
3	A	
4	A	
5	A	

f.....
VALIDADOR

CC: 0602762890