



**UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA**  
**ELÉCTRICA**

**Mejora de la eficiencia térmica en calderas pirotubulares  
mediante la regulación de sus parámetros de combustión para  
una empresa pesquera**

**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**

Ingeniero Mecánico Electricista

**AUTORES:**

Huamanchumo Calderón, Alberto Yofré (ORCID: 0000-0002-1843-1904)

Moreno Alvarez, Christian Alexander (ORCID: 0000-0003-4393-8157)

**ASESOR:**

Mg. Davila Hurtado, Fredy (ORCID: 0000-0001-8604-8811)

**LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:**

Generación, transmisión y distribución

**CHICLAYO – PERÚ**

**2022**

## **Dedicatoria**

Dedico este trabajo principalmente a Dios que me dio la fortaleza para seguir adelante, a mis padres por su comprensión y apoyo incondicional a lo largo de mis estudios. A mis abuelitos por ser una fuente de inspiración de constante esfuerzo y sabiduría.

Autor: Christian Alexander Moreno Alvarez

Dedicado primeramente a Dios, también a mis padres Alberto y Graciela, a mis hermanas Rosa Jesús y Marjhory Briggith, y en especial a mi esposa Valeria Esperanza Aguilar Tafur.

Autor: Alberto Yofré Huamanchumo Calderón

## **Agradecimiento**

A Dios por permitirme tener vida, salud y por encaminarme con personas que son mi soporte e inspiración.

A mis padres por darme la vida, amor, comprensión y educarme para lograr mis objetivos y ser un buen profesional.

Autor: Christian Alexander Moreno Alvarez

A Dios por sobre todas las cosas, por concederme la vida día a día y la oportunidad de finalizar con éxito esta etapa de mi vida.

A mis padres, hermanas y a mi esposa, quienes son el motivo infinito de mi perseverancia.

Autor: Alberto Yofré Huamanchumo Calderón

## Índice de contenidos

Carátula .....	i
Dedicatoria.....	ii
Agradecimiento .....	iii
Índice de contenidos.....	iv
Índice de tablas.....	v
Índice de gráficos y figuras.....	vi
Resumen.....	vii
Abstract.....	viii
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. MARCO TEÓRICO.....	4
III. METODOLOGÍA.....	12
3.1. Tipo y Diseño de Investigación .....	12
3.2. Variables de operacionalización .....	12
3.3. Población, muestra y muestreo Población .....	12
3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos .....	12
3.5. Procedimientos.....	18
3.6. Métodos de análisis de datos .....	21
3.7. Aspectos éticos .....	21
IV. RESULTADOS .....	22
V. DISCUSIÓN .....	54
VI. CONCLUSIONES.....	58
VII. RECOMENDACIONES .....	60
REFERENCIAS .....	61
ANEXOS.....	66

## Índice de tablas

Tabla 1. Valores típicos constante de Siegert, CO <sub>2</sub> y constante K1 .....	9
Tabla 2. Valores de índice de Bacharach .....	10
Tabla 3. Técnicas e instrumentos según los objetivos de investigación.....	12
Tabla 4. Registro de pérdidas por Método Indirecto NTP.350.300.2008-Caldera N°03-700 BHP.....	13
Tabla 5. Registro de pérdidas por Método Indirecto NTP.350.300.2008-Caldera N°04-800 BHP.....	14
Tabla 6. Registro de pérdidas por Método Indirecto NTP.350.300.2008-Caldera N°06-300 BHP.....	15
Tabla 7. Instrumento de valoración de aspecto de llama de combustión (marcar con x) .	16
Tabla 8. Instrumento de recopilación de datos de combustión de calderas.....	17
Tabla 9. Cuadro resumen de parámetros de combustión. ....	17
Tabla 10. Parámetros de combustión de caldera N° 03 en llama desarrollada al 75%.....	22
Tabla 11. Parámetros de combustión de caldera N° 04 en llama desarrollada al 75%.....	26
Tabla 12. Parámetros de combustión de caldera N° 06 en llama desarrollada 75% .....	30
Tabla 13. Resumen de eficiencias térmicas antes de la regulación .....	34
Tabla 14. Datos comparados de exceso de aire y Temp de gases de combustión .....	34
Tabla 15. Caracterización de la llama de combustión por color según el régimen .....	36
Tabla 16. Leyenda de interpretación de la llama de comb. por color según el régimen .	36
Tabla 17. Parámetros de combustión de caldera N° 03 de 700 BHP .....	38
Tabla 18. Parámetros de combustión de caldera N° 04 de 800 BHP .....	39
Tabla 19. Parámetros de combustión de caldera N° 06 de 600 BHP .....	40
Tabla 20. Datos de caldera pirotubular N° 03 de 700 BHP, posterior a la regulación.....	41
Tabla 21. Datos de caldera pirotubular N° 04 de 800 BHP, posterior a la regulación.....	42
Tabla 22. Datos de Caldera pirotubular N° 06 de 600 BHP, posterior a la regulación. ....	43
Tabla 23. Emisiones de CO en ppm para las calderas pirotubulares .....	44
Tabla 24. Datos de equiv. de emisiones de CO en mg/Nm <sup>3</sup> según NTP 350.301.2009 ..	47
Tabla 25. Resumen de cálculos de balance de energía y ahorro por ajuste de comb.....	51

## Índice de gráficos y figuras

Figura 1. Esquema de proceso de mediciones y sus objetivos .....	18
Figura 2. Procedimientos para calcular la eficiencia térmica de las 03 calderas .....	18
Figura 3. Procedimientos para mediciones y recopilación de datos de la comb .....	19
Figura 4. Procedimientos para cálculos de eficiencia térmica de Calderas.....	20
Figura 5. Eficiencia de combustión y regulación de llama en caldera de 700 BHP.....	38
Figura 6. Eficiencia de combustión y regulación de llama en caldera de 800 BHP.....	39
Figura 7. Eficiencia de combustión y regulación de llama en caldera de 600 BHP.....	40
Figura 8. Pérdidas de calor según método indirecto en caldera de 700 BHP .....	41
Figura 9. Pérdidas de calor según método indirecto en caldera de 800 BHP .....	42
Figura 10. Pérdidas de calor según método indirecto en caldera de 600 BHP. ....	43
Figura 11. Emisiones de CO para cada régimen de llama de combustión .....	44
Figura 12. Emisiones de CO en mg/Nm <sup>3</sup> comparado con régimen de llama y NTP.350.301.2009. ....	47
Figura 13. . Relación de consumo de combustible antes y posterior a la regulación de combustión .....	52
Figura 14. Exceso de aire antes y posterior a regulación de combustión, longitud de llama 75%.....	52

## Resumen

La investigación tuvo como objetivo general mejorar de la eficiencia térmica en calderas pirotubulares mediante la regulación de parámetros de combustión para una empresa pesquera cuyos objetivos específicos se orientaron a determinar la eficiencia térmica sin regulación de las calderas , regular el desarrollo de llama de combustión, registrar parámetros de combustión para cada desarrollo de llama y determinar las pérdidas de calor mediante método indirecto y obtener la eficiencia térmica de las calderas posterior a la regulación de combustión.

La metodología de trabajo consistió en aplicar un proceso de regulación de longitud de llama desde mínima, 25%, 50%, 75% y 100% de su longitud en relación al aire de entrada para medir la calidad de combustión, además para determinar los parámetros se utilizó un analizador de gases marca testo 330, y la NTP.350.300.2008 que establece procedimientos para determinación de la eficiencia térmica de las calderas industriales.

Los resultados obtenidos indican que antes de la regulación de combustión las calderas N° 03 de 700 BHP, la caldera N° 04 de 800 BHP y la caldera N° 06 de 600 BHP tuvieron eficiencias térmicas de 80.93%, 81.64% y 76.37% respectivamente, posterior a la regulación se obtuvieron eficiencias de 83.20%,83.08% y 81.37%, respectivamente además las emisiones de monóxido de carbono CO, la caldera más crítica fue la N°06 de 600 BHP registrando un valor de 137.5 mg/Nm<sup>3</sup> a longitud de 75% de llama y 162.5 mg/Nm<sup>3</sup> al 100% de longitud de llama, correspondiendo al 39.28% y 46.42% respectivamente del valor límite máximo permisible que equivale a 350 mg/Nm<sup>3</sup> según la NTP.300.301.2009 estándares de eficiencia térmica(combustible/vapor) y etiquetado, el ahorro de combustible posterior a la regulación indica que en la caldera de 700 BHP se obtiene un ahorro de 4 gal/h , para la caldera de 800 BHP, se tiene 5 gal/h y la caldera de 600 BHP se tiene 3 gal/h alcanzando ahorros económicos anuales en 72 750 soles, 65 025 soles y 42 916 soles respectivamente

**Palabras clave:** Regulación, combustión, eficiencia térmica, emisiones ambientales.

## Abstract

The general objective of the research was to improve the thermal efficiency in firetube boilers by regulating combustion parameters for a fishing company whose specific objectives were aimed at determining the thermal efficiency without regulation of the boilers, regulating the development of combustion flame, recording combustion parameters for each flame development and determine the heat losses by indirect method and obtain the thermal efficiency of the boilers after combustion regulation.

The work methodology consisted of applying a flame length regulation process from minimum, 25%, 50%, 75% and 100% of its length in relation to the inlet air to measure the combustion quality, in addition to determining the parameters a testo 330-brand gas analyzer was used, and the NTP.350.300.2008 that establishes procedures for determining the thermal efficiency of industrial boilers.

The results obtained indicate that before combustion regulation, boilers No. 03 of 700 BHP, boiler No. 04 of 800 BHP and boiler No. 06 of 600 BHP had thermal efficiencies of 80.93%, 81.64% and 76.37% respectively, after In the regulation, efficiencies of 83.20%, 83.08% and 81.37% were obtained, respectively, in addition to carbon monoxide CO emissions, the most critical boiler was No. 06 of 600 BHP registering a value of 137.5 mg / Nm<sup>3</sup> at 75% flame length and 162.5 mg / Nm<sup>3</sup> at 100% flame length, corresponding to 39.28% and 46.42% respectively of the maximum permissible limit value that is equivalent to 350 mg / Nm<sup>3</sup> according to NTP.300.301.2009 thermal efficiency standards (fuel / steam) and labelled, the fuel savings after regulation indicates that in the 700 BHP boiler you get a saving of 4 gal / h, for the 800 BHP boiler, you have 5 gal / h and the 600 BHP boiler you have 3 gal / h reaching economic savings annuls is 72,750 soles, 65,025 soles and 42,916 soles respectively

**Keywords:** Regulation, combustion, thermal efficiency, environmental emissions.



## I. INTRODUCCIÓN

La operación y el procesamiento de harina de pescado requiere de la producción de energía térmica para calentamiento, cocción de materia prima y otros fluidos de proceso en las actividades industriales de la empresa pesquera, la cual es abastecida por la operación de las calderas pirotubulares a vapor, las cuales funcionan en condiciones de eficiencia y calidad con uso de recursos energéticos combustibles y agua de alimentación, la forma de transferir calor y la producción de vapor saturado y su calidad térmica que es utilizada en mayor proporción para cocinado, secado y evaporación en las diversas etapas de producción.

El área de estudio se orientó a la planta de generación de vapor que está conformada por 07 calderas pirotubulares de las cuales 03 calderas son de 700 BHP, 02 de 800 BHP, 01 de 900 BHP y 01 de 600 BHP, cuyas condiciones técnicas de operación diagnosticadas fueron producidas por deficiencias en el sistema de combustión detectándose que 03 calderas operaban con baja eficiencia, en tales condiciones las calderas emitían gases con parámetros cercanos a los límites máximos permisibles considerándose que era necesario controlar el proceso de combustión hasta hacerla eficiente.

La operación eficiente de las calderas pirotubulares requiere la ejecución de un programa exigente de control y regulación periódica de eficiencia de combustión orientado a obtener un valor superior al 80% para el tipo de combustible que se utiliza y el control de múltiples variables para mantener el equilibrio operativo entre eficiencia, económica, impacto ambiental, y continuidad del servicio, situación que ha sido deficiente en los últimos 9 meses de operación y que ha significado retrasos en la operación y servicio específicamente de 03 unidades de calderas que habían ocasionado cortes de suministro de vapor de forma temporal en planta afectando la demanda de vapor y en consecuencia calidad de las etapas de los procesos térmicos, tomándose medidas de soluciones rápidas y críticas para dar continuidad al servicio, teniéndose en algunos casos la salida de operación de una a tres calderas a vapor. Esta situación problemática conlleva a pérdidas económicas y la situación se hace recurrente en planta por lo que se ha propuesto medidas de estudio y diagnóstico integral de la operación del sistema de producción de vapor a

fin de identificar y determinar las causas y sus orígenes cuya relación induce a realizar un exhaustivo seguimiento y revisión de las variables que intervienen en la combustión haciendo posible su análisis bajo uso de instrumentación de especialidad. Para ello se considera el estudio a el exceso de aire de combustión, temperatura de evacuación de gases por chimenea y la forma en que se distribuyen los calores considerando la aplicación de la NTP.350.300.2008 donde se aplica la metodología de balance de calor por método indirecto para determinar las pérdidas de forma porcentual y cualificar y cuantificar los parámetros a fin de realizar ajustes en la combustión para optimizar su eficiencia y conseguir mejoras optimizando la eficiencia térmica sostenido en el estudio riguroso de componentes de gases de combustión como CO<sub>2</sub>, CO , mediante el diagnostico instrumental con analizador de gases.

La ejecución de la investigación sobre la base problemática expuesta permitirá asegurar la operación eficiente del sistema de producción de vapor, la calidad de combustión, transferencia de calor, la producción de vapor óptima en términos de su calidad de vapor saturado y emisiones de gases controladas a razón de la regulación de combustión por lo cual se plantea la formulación del problema. ¿En qué porcentaje mejora la eficiencia térmica en las calderas pirotubulares mediante la regulación de sus parámetros de combustión?

La investigación tiene base de justificación 03 aspectos importantes en las actividades productivas de la empresa. El aspecto técnico se orienta a las oportunidades de mejora de la capacidad de operación de las calderas pirotubulares, orientado a las características y calidad de la combustión basado en el principio de proporción de mezcla de aire y combustible, de la operación adecuada de los sistemas auxiliares y de las formas de transferir de calor y el proceso de evaporación.

Además la investigación se justifica desde el ámbito de la economía de operación considerando que una regulación de combustión deficiente produciría un exceso de gasto de combustible , considerando también que la investigación se justifica desde el ámbito ambiental debido a que, si las calderas pirotubulares mantienen una regulación adecuada de operación considerando una mejora de su eficiencia

térmica, las emisiones de gases de combustión serán controlados, es decir sus parámetros de medición o porcentajes de sus componentes estarán dentro del límite máximo permisible que exige la NTP 350.301.2009 a fin de evitar contaminación al medio ambiente y recaer en sanciones o penalidades.

El objetivo general de la investigación se orientó en mejorar la eficiencia térmica en las calderas pirotubulares, mediante la regulación de sus parámetros de combustión para una Empresa Pesquera, así mismo los objetivos específicos consistieron en: (1). Determinar la eficiencia térmica actual de las calderas pirotubulares, mediante el balance de energía térmica usando método indirecto según NTP 350.300.2008. (2) Regular el desarrollo de la llama de combustión, registrando los parámetros de las principales componentes de gases de combustión. (3) Registrar los parámetros de combustión para cada desarrollo de llama de combustión. (4). Determinar las pérdidas de calor mediante el método indirecto, obteniendo la eficiencia térmica de las calderas posterior a la regulación de combustión, las emisiones ambientales y el ahorro económico posterior a la regulación de combustión.

## II. MARCO TEÓRICO

A continuación, se presenta los antecedentes relacionados a la investigación.

Quispe y Apaza (2015), en su tesis diseño de una caldera pirotubular de 15 BHP con parámetros de trabajo para altitudes superiores a los 3800 m.s.n.m, Juliaca. Debido a que la investigación se orienta a altitudes superiores a 3800 m.s.n.m, determinaron que hay defecto de oxígeno la cual no generaba buena combustión para producir vapor. Por consiguiente, se determinó que el parámetro de mayor implicancia es la eficiencia de la caldera, y por consiguiente se propuso que la aplicación del método indirecto es idónea para hallar las pérdidas que determinan esta eficiencia. Asimismo, mediante cálculos, se intentó mantener la eficiencia más elevada de los calderos desde 65% a 85% en operación, a nivel del mar, por lo que la investigación se orientó a sostener el rango promedio, operando en altura.

Brances y Mazuera , (2014) , en la tesis titulada: “Análisis, diagnóstico y propuesta de mejora de los principales componentes operacionales que afectan la eficiencia de la caldera pirotubular del laboratorio de vapor de la universidad autónoma de occidente”, cuyo objetivo es analizar los principales componentes operacionales que influyen en el rendimiento de la caldera pirotubular de la UAO y generar propuestas de mejora, establece el análisis del proceso de combustión y cuantificar su desempeño, el método empleado consistió en la aplicación del balance de energía y exergía orientado a la cuantificación de la energía química que se desarrolla produciendo calor de combustión. El resultado señala que la baja eficiencia se atribuye a la temperatura baja en agua de alimentación y la excesiva temperatura de gases que salen por la chimenea, en general la eficiencia del sistema mejora en 2%.

Jiménez, F. (2017), en la tesis: “Propuesta de mejora para el proceso de generación de vapor de Gelymar S.A”, tuvo como objetivo proponer alternativas de mejora de generación de vapor en la sala de calderas, asimismo también definir las características operacionales actuales mediante recursos de acceso y levantamiento de información y evaluación económica, La metodología empleada consistió en la aplicación de métodos de evaluación de eficiencia de caldera mediante balance de primera ley de la termodinámica asimismo. Los resultados concluyen que el sistema opera con una eficiencia del 80% además de haber

propuesto la adición de un sistema de control y regulación en el exceso de aire para mantener los niveles controlados de componentes de gases de combustión en la caldera, además como resultado de la mejora establecen que se produjo una disminución de costos de 1,62\$ por tonelada de vapor y un ahorro anual que asciende a \$86.000.000.

Paredes, G (2016), en la 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. Alternativa que permite aumentar la eficiencia energética”. Tuvo como objetivo evaluar la influencia de los parámetros indicados de operación de la caldera pirotubular en el consumo de combustible y la eficiencia energética del proceso, asimismo detectar las limitaciones que ocasionan baja eficiencia, establecer indicadores energéticos, y hacer una valoración económica y ambiental. La metodología consistió en la aplicación del método indirecto para eficiencia de calderas basado en ASME PTC4.1 con sus métodos ASME PTC 4.1, 1999 y Ganapathy, 2015).

Celada, J (2017), en la tesis “Programa de eficiencia energética para incrementar la eficiencia de los calderos de vapor del Hospital Regional de Lambayeque 2017”, propuso como objetivo principal diseñar un programa de eficiencia energética para incrementar la eficiencia de los calderos de vapor, asimismo calcular la eficiencia actual, identificar sus parámetros, establecer propuestas y cuantificar resultados. La metodología desarrollada consistió en el uso del diseño de investigación transversal descriptivo no experimental y la metodología de balance de energía. Los resultados muestran la eficiencia de la caldera pirotubular N° 01 en 73% y la caldera pirotubular N° 02 en 78%, luego las eficiencias mejoraron hasta 89% y 87% respectivamente alcanzando una producción de vapor en conjunto de 2160,10 Kg/h.

Bocanegra, W. (2017), en la tesis “Influencia de los parámetros de operación en el rendimiento de la caldera pirotubular en una planta de harina, 2017. Tuvo como objetivo principal determinar la influencia de los parámetros de operación en el rendimiento de la caldera pirotubular, además estimando el nivel de exceso de aire, temperatura de aire de combustión y su temperatura de agua de alimentación. La

metodología empleada consistió al tipo descriptivo con propuesta cuantitativa y transversal aplicando además la NTP.350.300.2008 con el método indirecto para determinar las pérdidas de calor. Los resultados indican que la caldera pirotubular incremento su eficiencia desde 82.82% hasta 85.74% lográndose reducir además el exceso de aire desde 65% hasta 30% llegando a reducirse el gasto de combustible desde 200 galones a 193.2 galones por hora.

## **2.1 Planta de harina de pescado**

Es el conjunto de equipos industriales térmicos y mecánicos que procesan pescado para su transformación en harina de pescado.

## **2.2 Proceso productivo**

La materia prima es desembarcada de las bodegas de la embarcación por personal, mediante 02 líneas de descarga con bombas horizontales de cavidad progresiva, accionadas por unidades hidráulicas con capacidad de 200 t de pescado por hora cada línea, una mezcla de agua de mar y pescado en una proporción 1:1 aprox. añadida a la bodega de la embarcación por inundación. El equipo de bombeo está instalado en una Chata, instalación flotante desde donde la pesca es transportada mediante dos tuberías de material HDPE (High Density Polietylene) de 16" de diámetro y 1000 m aprox. de longitud hacia los desagües rotativos ubicados en Planta (Pacífico centro, 2018).

La operación de prensado es de alta importancia en el proceso de elaboración de harina efectuada con la finalidad de remover la mayor cantidad posible de aceite y agua del pescado cocido. La Planta cuenta con tres prensas de doble tornillo accionadas hidráulicamente. El prensado es continuo y la prensa consiste de una caja con doble tornillo de paso y diámetro variado con el objeto de admitir un mayor volumen de materia prima y exprimirla contra una malla exterior, que permita la fuga del licor de prensa a través de los agujeros de la malla; obteniéndose finalmente una pasta de prensa con una composición de 42 a 47% de humedad. (Pacífico centro, 2018).

### **2.3 Calderas de vapor pirotubular**

En las calderas los gases de combustión que contiene temperaturas altas pasan por los tubos, estos tubos se encuentran sumergidos en agua tratada.

Actualmente hay diversos tipos de calderas, Sanz y Patiño (2014), mencionan que es un recipiente metálico cilíndrico conformado por paquetes de tubos, en cuyo interior pasan gases de combustión, que transmite calor al agua que envuelve el exterior de los tubos. Estos se configuran en su forma vertical u horizontales. Dependiendo de su nivel presión de operación, se clasifican también, los que son inferiores a los 19 bar, se catalogan de presión baja, si son superiores a los 62,76 bar se catalogan de media presión. En el sector industrial las calderas de pequeñas empresas usan las de presión baja (Montalvo, 2000).

### **2.4 Clasificación de calderas pirotubulares**

Según los niveles de presión de servicio las calderas pirotubulares se clasifican en:

- Presión baja: menores a  $20\text{kg/cm}^2$  o 19.60 bar.
- Presión media: de 20 – 64  $\text{kg/cm}^2$  o 19.60 – 62.76 bar.

En el medio industrial local, el sector curtiembre normalmente utiliza calderos de presiones bajas.

### **2.5 Componentes o partes de una caldera**

- **Cuerpo exterior de una caldera**

Este componente tiene forma cilíndrica y contiene al fluido (agua/vapor) y evitar que escapen al exterior, en la misma va instalada los sistemas auxiliares y accesorios de medición y control.

- **Cámara de combustión**

La cámara de combustión puede fabricarse en forma lisa u ondulada en función a la capacidad o potencia evaporativa y de la presión de servicio de la misma.

- **Chimenea**

Es la parte de la externa de la caldera que tiene como finalidad producir el tiro requerido para la salida de gases hacia la atmosfera y propiciar una buena combustión.

- **Tiro de combustión**

Es un accesorio conformado de una compuerta de metal puesto sobre el ducto de humo que conecta a la chimenea.

## 2.6 Soluciones de eficiencia energética en caldera.

El punto más importante a considerar para obtener una eficiencia térmica óptima se relaciona a minimizar las emisiones, rendimiento alto y seguridad en operaciones. Ahora se tiene respaldo de tecnologías que permite operar a altas eficiencia.

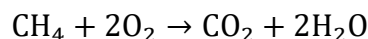
## 2.7 Poder calorífico

Capacidad de un combustible de liberar calor, se mide cantidad de calor por unidad de masa.

- **Poder calorífico superior (Pcs):** La energía transferida en el enfriamiento después de una quema es igual a la energía liberada durante la combustión. El Pcs aprovecha la energía de condensación del agua (el agua queda como líquido) por lo que se genera más calor.
- **Poder calorífico inferior (Pci):** Es igual a la diferencia del poder calorífico superior del combustible y la entalpía de vaporización del agua producto de la combustión. El Pci no aprovecha la energía de condensación del agua (el agua queda como vapor).

## 2.8 Reacción de combustión

Consiste en la reacción química exotérmica de una sustancia o mezcla de sustancias llamada combustible con un medio oxidante que permite desarrollar una llama de combustión con aporte de calor.



## 2.9 Relación aire-combustible

$$m_{a/c} = \frac{n_a \cdot M_{wa}}{n_c \cdot M_{wc}} = \frac{\text{masa de aire}}{\text{masa de combustible}}$$



Donde n son moles de aire (a) y combustible (c) y MW son los respectivos pesos moleculares.

### 2.10 Relación de O<sub>2</sub> en los gases de combustión.

Esta relación compara la cantidad de moléculas o unidades de oxígeno presente en los gases de chimenea e indica la medida de exceso o defecto que ha suscitado un tipo de combustión.

### 2.11 Balance de energía en calderas pirotubulares

Por el Método de las pérdidas indirectas de la: NTP.350.300.2008,

Pérdida por la entalpía de los gases de escape secos (P<sub>1</sub>)

$$P_1 = k * \left\{ \frac{(T_g - T_a)}{[CO_2]} \right\} \quad (1)$$

Donde la constante de Siegert *k* está en función al tipo de Combustible.

Tabla 1. Valores típicos constante de Siegert, CO<sub>2</sub> y constante K1

Tipo	Cte. de Siegert (k)	CO <sub>2</sub> máx. %	Constante (k <sub>1</sub> )
Residuales	0.53	15.8	54
Diésel	0.49	13.8	53
Glp	0.4	13.8	48
Gas natural	0.35	11.9	40

Fuente: NTP.350.300.2008.

Pérdida por la entalpía del vapor de agua en los gases (P<sub>2</sub>)

$$P_2 = \frac{\{([H_2O]+9*[H])*(210-4,2*T_a+2,1*T_g)\}}{PCS} \quad (2)$$

T<sub>g</sub>: valor de temperatura de los gases de salida de chimenea.

T<sub>a</sub>: Temperatura del medio ambiente.

[H<sub>2</sub>O]: % Agua en los gases de la combustión.

[H]: % de Hidrógeno en los gases de la combustión.

Pérdida por inquemados gaseosos (P<sub>3</sub>)

$$P3 = k_1 * \left\{ \frac{[CO]}{([CO_2] + [CO])} \right\} \quad (3)$$

Dónde  $k_1$  constante de Inquemados del Combustible.

[CO<sub>2</sub>]: % de Dióxido de Carbono en los gases de la combustión.

[CO]: % de Monóxido de Carbono en los gases de la combustión.

Pérdida por inquemados sólidos (P<sub>4</sub>)

$$P4 = 0.14 * B^2 + 0.08 * B + 0.07 \quad (4)$$

Tabla 2. Valores de índice de Bacharach

<b>Índice de Bacharach [B]</b>	<b>Calificación</b>	<b>Efectos</b>
1	Excelente	No hay hollín
2	Buena	Hollín muy reducido
3	Regular	Cierta cant. de hollín
4	Pobre	Hollín visible
5	muy pobre	Hollina muy visible
6 a 9	Pobrísima	Hollín muy muy visible

Fuente: NTP.350.300.288

Pérdida por convección (P<sub>5</sub>)

$$P5 = 80 * \left( \frac{Q_{P5}}{W_c} \right) \quad (5)$$

Dónde:

$$Q_{P5} = h_{cf} * A_f * (T_{sf} - T_a) + h_{cg} * A_g * (T_{sg} - T_a)$$

$$h_{cf} = 1.973 * 10^{-3} * (T_{sf} - T_a)^{0.25} * (2.857 * v + 1)^{0.5}$$

$$h_{cg} = 1.973 * 10^{-3} * (T_{sg} - T_a)^{0.25} * (2.857 * v + 1)^{0.5}$$

$$W_c = 9.81 * BHP$$

Pérdida por radiación ( $P_6$ )

$$P_6 = 80 * (Q_{P6}/W_C) \quad (6)$$

Dónde:

$$Q_{P6} = (q_{rf} * A_f) + (q_{rg} * A_g)$$
$$q_{rf} = 5.763 * 10^{-11} * \epsilon * [(T_{sf} + 273)^4 - (T_a + 273)^4]$$
$$q_{rg} = 5.763 * 10^{-11} * \epsilon * [(T_{sg} + 273)^4 - (T_a + 273)^4]$$
$$W_C = 9.81 * \text{BHP}$$

## 2.12 Teoría de combustión

Las combustiones consisten en un proceso de reacciones de oxidación que emite calor, que se origina a partir de dos componentes, un combustible en condición solido o granulado, liquido o gaseoso.

- **Estequiometria de la combustión**

La estequiometria de combustión consiste en la relación másica y volumétricas en reactantes y productos y los tipos de reacción puede clasificarse en:

- ✓ **Combustión completa:** Proceso donde se obtiene la oxidación total del combustible.
  - ✓ **Combustión incompleta:** Se produce cuando los carbonos no se oxidan totalmente produciendo residuos o inquemados.
  - ✓ **Combustión estequiometria:** Se considera estequiometria cuando se aporta la cantidad exacta de oxígeno a la mezcla logando oxidar completamente al combustible, esta condición es teórica y en la práctica se adiciona un exceso de aire moderado para completar la reacción de combustión.
- **Coefficiente de exceso de aire:** Es una medida de la relación de oxígeno presente en relación al combustible, pueden darse dos situaciones, el exceso y defecto de aire.

### III. METODOLOGÍA

#### 3.1. Tipo y Diseño de Investigación

La investigación es cuantitativa y de diseño experimental, ya que se analizó y recolectó los datos a partir de un instrumento de medición que cuantifica las unidades de componentes de gases de combustión para analizarse a partir de la regulación de la variable de entrada (aire) y medir los efectos sobre los componentes de gases que son expulsados por la chimenea.

#### 3.2. Variables de operacionalización

- **Variable Dependiente**
  - ✓ Eficiencia de combustión
- **Variable Independiente**
  - ✓ Regulación de parámetros de combustión

#### 3.3. Población, muestra y muestreo Población:

**Población:** Las calderas pirotubulares de las plantas pesqueras de Chimbote.

**Muestra:** 03 calderas de una empresa pesquera

**Muestreo:** No probabilística / Discrecional.

#### 3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

La técnica utilizada es la observación y el análisis documental, para registrar los parámetros se utiliza los instrumentos de recolección de datos como fichas técnicas y fichas de control.

Tabla 3. Técnicas e instrumentos según los objetivos de investigación

Objetivo	Técnica	Instrumento
Balance térmico Mediante NTP	Observación	Ficha de observación de recolección de datos
Regulación llama de combustión	Observación	Ficha de observación de recolección de datos
Determinar pérdidas (calculo método indirecto)	Observación	Formato estándar de registro de datos de diagnóstico de calderas

Fuente: Elaboración propia

### 3.4.1 Instrumento para el objetivo 1

Aspectos del balance de energía térmica.

Tabla 4. Registro de pérdidas por Método Indirecto NTP.350.300.2008-Caldera N°03-700 BHP

Combustión		Pérdidas	Valor (%)	Eficiencia
Caldera 1	Fuego mínimo			
	Fuego 25%			
	Fuego 50%			
	Fuego 75%			
Fuego 100%				

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5. Registro de pérdidas por Método Indirecto NTP.350.300.2008-Caldera N°04-800 BHP

Combustión		Pérdidas	Valor (%)	Eficiencia
Caldera 2	Fuego mínimo			
	Fuego 25%			
	Fuego 50%			
	Fuego 75%			
Fuego 100%				

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6. Registro de pérdidas por Método Indirecto NTP.350.300.2008-Caldera N°06-300 BHP

Combustión		Pérdidas	Valor (%)	Eficiencia
Caldera 03	Fuego mínimo			
	Fuego 25%			
	Fuego 50%			
	Fuego 75%			
Fuego 100%				

Fuente: Elaboración propia

### 3.4.2. Instrumento para el objetivo 2

Aspectos de la regulación de llama de combustión

Tabla 7. Instrumento de valoración de aspecto de llama de combustión (marcar con x)

Caracterización de color de llama de combustión a diferentes longitudes de llama					
LLAMA DE COMBUSTION	TAMAÑO DE LLAMA	COLOR DE LLAMA	CALDERA 01	CALDERA 02	CALDERA 03
	Fuego mínimo	Rojizo			
		Anaranjado			
		Amarillo			
	Fuego al 25%	Rojizo			
		Anaranjado			
		Amarillo			
	Fuego al 50%	Rojizo			
		Anaranjado			
		Amarillo			
	Fuego al 75%	Rojizo			
		Anaranjado			
Amarillo					
Fuego al 100%	Rojizo				
	Anaranjado				
	Amarillo				

Fuente: Elaboración propia



### 3.4.3 Instrumento para el objetivo 3

Determinación de pérdidas de calor en gases (NTP.350.300.2008).

Tabla 8. Instrumento de recopilación de datos de combustión de calderas.

Proceso	Calderas	Tamaño de llama	Mediciones de gases					
			Dióxido	Monóxido	EA	Oxígeno	Temp. Gases	Eficiencia Combustión
Medición	Caldera 1	Mínimo						
		25%						
		50%						
		75%						
		100%						
	Caldera 2	Mínimo						
		25%						
		50%						
		75%						
		100%						
	Caldera 3	Mínimo						
		25%						
		50%						
		75%						
		100%						

Fuente: Elaboración propia

Tabla 9. Cuadro resumen de parámetros de combustión.

	elemento	valor	unidad
<b>Eficiencia de combustión</b>			
Oxígeno	O <sub>2</sub>		%
Dióxido de Carbono	CO <sub>2</sub>		%
Exc. de aire	EA		%
Temp. de gases	Ts		°C
Temp. de ambiente	Tamb		°C
Monóxido de carbono	CO		ppm

Fuente: Elaboración propia.

### 3.5. Procedimientos

Para la obtención de datos se recurrió a la data y estadística de procesos de mediciones anteriores que se registran de forma periódica en la bitácora del control de operación de caldera, asimismo se procedió al acondicionamiento del equipo con fines de realizar los ajustes de combustión al regular el aire de entrada de alimentación a las caderas, los datos consignados se registraron mediante fichas técnicas apropiadas y fichas de control. Los cuales se procesaron mediante las herramientas metodológicas (NTP 350.300.2008) y se calculó los principales indicadores de las variables de estudio entre ellas los relacionados a la eficiencia de las calderas pirotubulares.

A continuación, se describen los procesos de mediciones de componentes de gases de combustión y la etapa aplicación de la NTP.350.300.2008 para el cálculo de las pérdidas porcentual de calor para determinar la eficiencia térmica de los calderos pirotubulares.

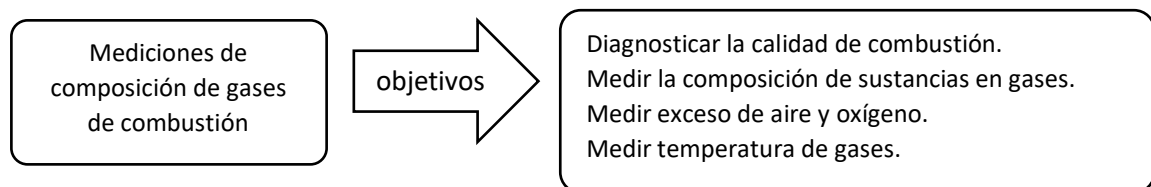


Figura 1. Esquema de proceso de mediciones y sus objetivos

Fuente: Elaboración propia

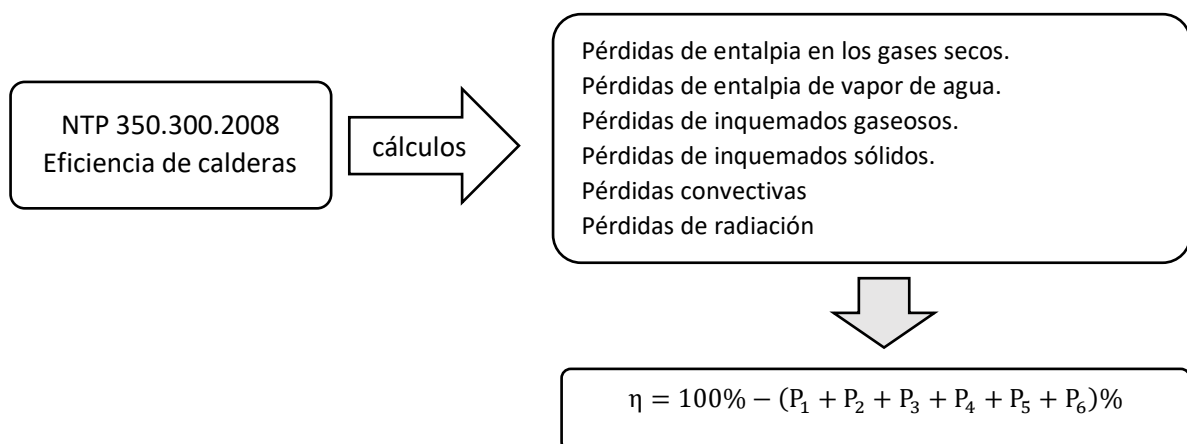


Figura 2. Procedimientos para calcular la eficiencia térmica de las 03 calderas

Fuente: Elaboración propia

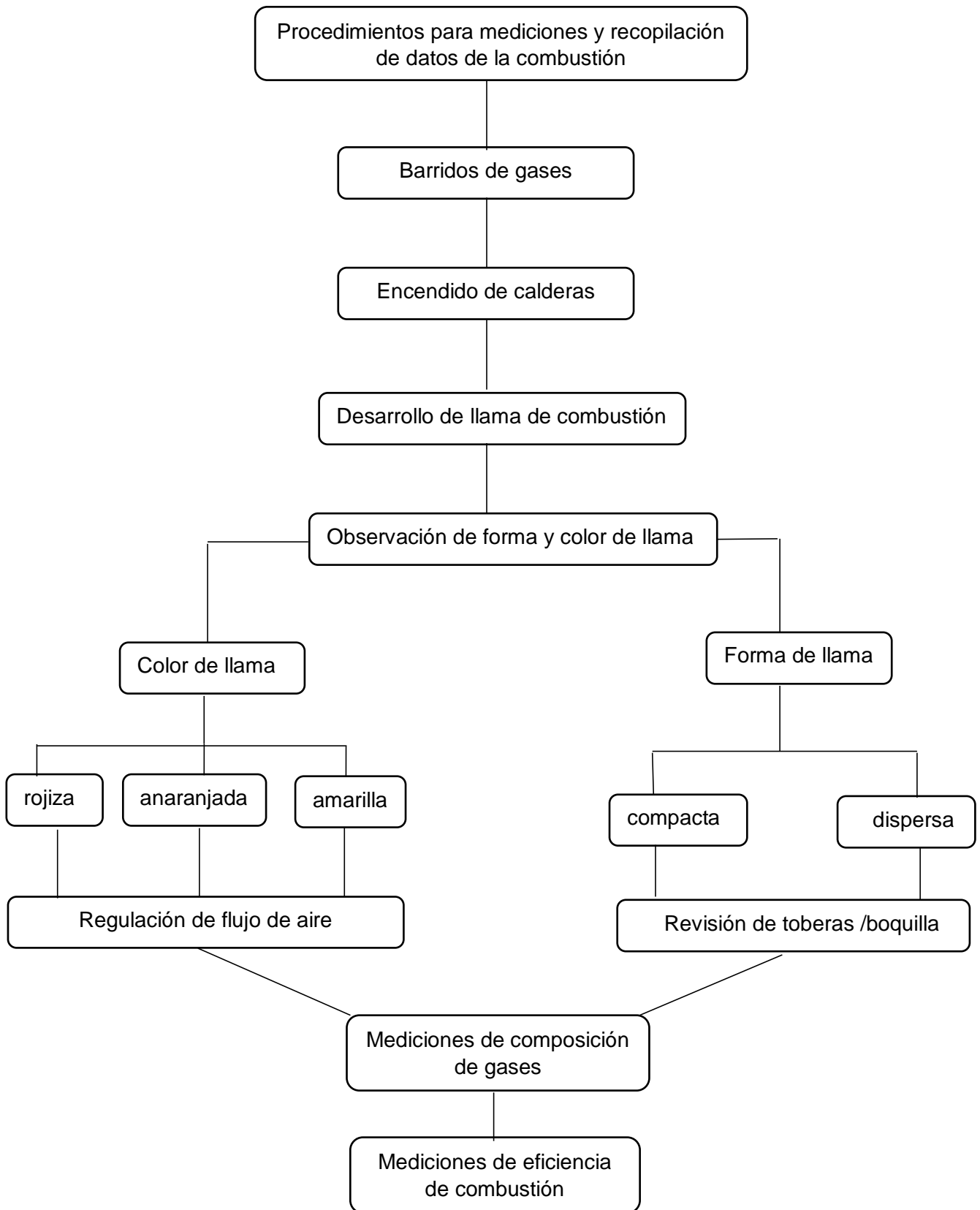


Figura 3. Procedimientos para mediciones y recopilación de datos de la combustión

Fuente: Elaboración propia

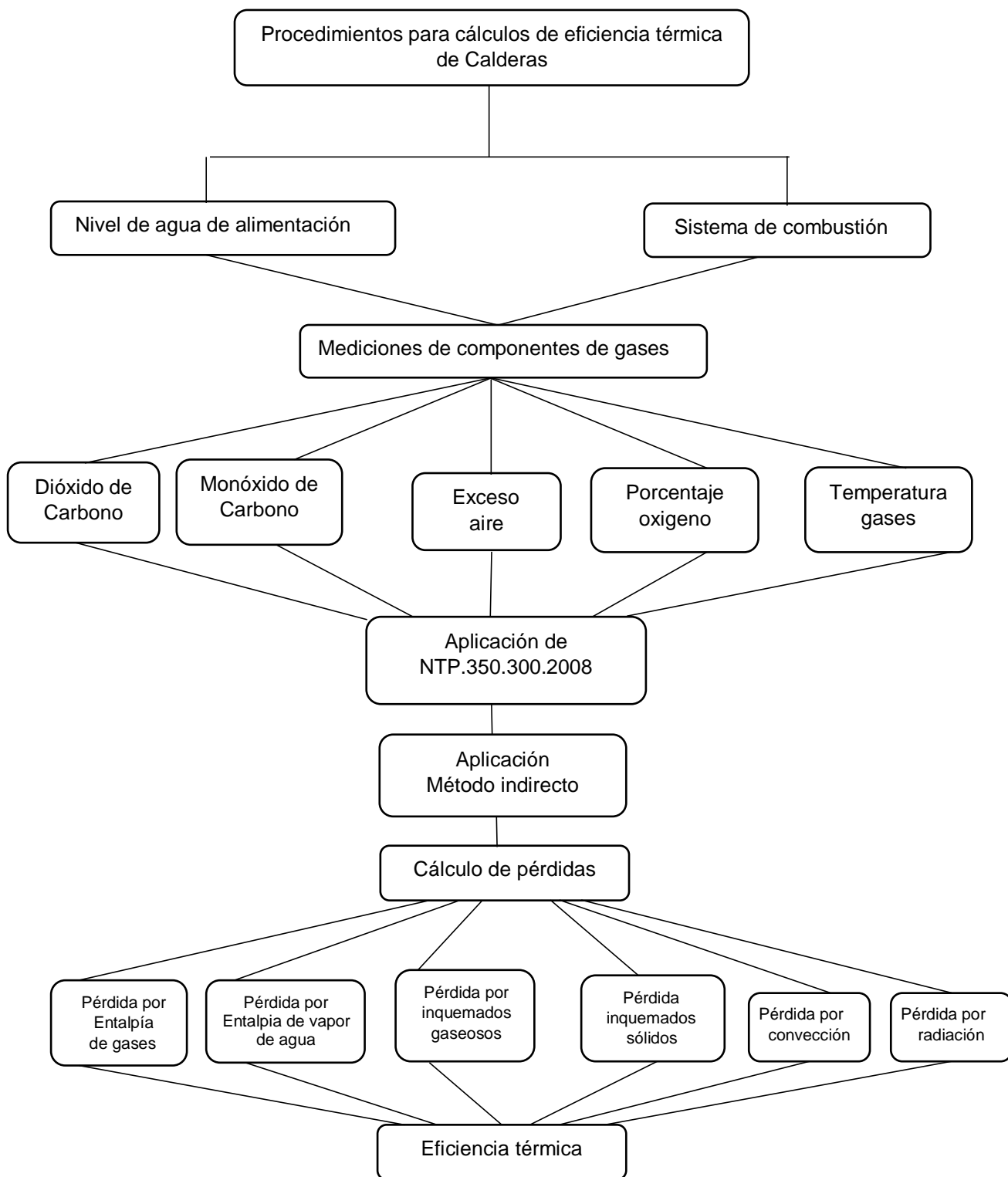


Figura 4. Procedimientos para cálculos de eficiencia térmica de Calderas

Fuente: Elaboración propia

### **3.6. Métodos de análisis de datos**

Se realizó el análisis documental de registro de datos de operación anteriores al proceso de investigación y se comparó con datos recomendados en los manuales técnicos de operación, asimismo se utilizó la NTP.350.300.2008 para la estimación de la eficiencia térmica, empleando el método indirecto para su evaluación y la NTP.350.301.2009 que regula las emisiones ambientales en calderas pirotubulares.

### **3.7. Aspectos éticos**

El informe de investigación se basa en los datos registrados que confieren los autores para los cuales se documentan pruebas de su veracidad en anexos a fin de contar con evidencia fehaciente para el análisis posterior, respetando los derechos de las fuentes de información para el proceso metodológico y teórico, citando y referenciando a las fuentes.

## IV. RESULTADOS

### 4.1 Determinación de la eficiencia térmica actual de las calderas pirotubulares N° 03,04 y 06 (primer objetivo)

La planta pesquera dispone de 7 calderas pirotubulares de las cuales se determinaron que la caldera N° 03, 04 y 06 presentan eficiencias de combustión por debajo del nivel recomendado para el tipo de combustible que actualmente utiliza (Petróleo residual N° 6), a continuación, se describe las características y condición operativa de los equipos en mención.

#### 4.1.1 Cálculo de la eficiencia actual de la caldera pirotubular N° 03 -700 BHP.

Eficiencia de caldera N° 03 de 700 BHP, sin regulación de combustión.

Tabla 10. Parámetros de combustión de caldera N° 03 en llama desarrollada al 75%

Parámetros	Símb.	unidades	valor
Presión de operación	Pop.	Psig	110
Oxígeno	O <sub>2</sub>	%	9.5
Monóxido de Carbono	CO	ppm	76
Dióxido de Carbono	CO <sub>2</sub>	%	9.1
Temperatura de humos	T <sub>g</sub>	°C	219.4
Exceso de Aire	Ea	%	78.3
Eficiencia de Combustión	n	%	84.4
Opacidad	Op.		2

Fuente: Elaboración propia

Aplicación de NTP.350.300.2008, Método Indirecto.

Pérdida por la entalpía de los gases de escape secos (P<sub>1</sub>)

$$P_1 = k * \left\{ \frac{(T_g - T_a)}{[CO_2]} \right\} \% \dots (1)$$

Constante de Sievert  $k = 0.53$  ,reemplazando se tiene

$$P_1 = 0.53 * \left\{ \frac{(219.4 - 33.2)}{[9.1]} \right\} \%$$

$$P_1 = 10.84 \%$$

Pérdida por la entalpía del vapor de agua en los gases ( $P_2$ )

$$P_2 = \frac{\{([H_2O] + 9 * [H]) * (2488 - 4,2 * T_a + 2,1 * T_g)\}}{PCS} \dots (2)$$

$$H = 10 \%$$

$$H_2O = 0\%$$

$$T_g: 219.4^\circ C$$

$$T_a: 33.2^\circ C$$

$$[H_2O]: 0 \%$$

$$[H]: 10 \%$$

$$P_2 = \frac{\{(0 + 9 * [10]) * (2488 - 4,2 * (33.2) + 2,1 * (219.4))\}}{42099}$$

$$P_2 = 6.00\%$$

Pérdida por inquemados gaseosos ( $P_3$ )

$$P_3 = k_1 * \left\{ \frac{[CO]}{([CO_2] + [CO])} \right\} \dots (3)$$

Dónde  $k_1 : 54$

$$[CO_2]: 9.1 \%$$

$$[CO]: 76 \text{ ppm} = 0.0076 \%$$

$$P_3 = 54 * \left\{ \frac{[0.0076]}{([9.1] + [0.0076])} \right\} \% = 0.0450 \%$$

Pérdida por inquemados sólidos ( $P_4$ )

$$P_4 = 0.14 * B^2 + 0.08 * B + 0.07 \dots (4)$$

De tabla de índice de Bacharach: B=3

$$P4 = 0.14 * (3)^2 + 0.08 * (3) + 0.07 = 1.57\%$$

Pérdida por convección (P<sub>5</sub>)

$$P5 = 80 * \left( \frac{Q_{P5}}{W_c} \right) \dots (5)$$

Calculando

$$\begin{aligned} h_{cf} &= 1.973 * 10^{-3} * (T_{sf} - T_a)^{0.25} * (2.857 * v + 1)^{0.5} \\ h_{cf} &= 1.973 * 10^{-3} * (67.5^\circ\text{C} - 33.2^\circ\text{C})^{0.25} * \left( 2.857 * \left( 0.3 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right) + 1 \right)^{0.5} \\ &= 6.506 * 10^{-3} \frac{\text{kW}}{\text{m}^2^\circ\text{C}} \end{aligned}$$

Calculando

$$\begin{aligned} h_{cg} &= 1.973 * 10^{-3} * (T_{sg} - T_a)^{0.25} * (2.857 * v + 1)^{0.5} \\ h_{cg} &= 1.973 * 10^{-3} * (81.4^\circ\text{C} - 33.2^\circ\text{C})^{0.25} * \left( 2.857 * 0.3 \frac{\text{m}}{\text{s}} + 1 \right)^{0.5} \\ &= 7.084 * 10^{-3} \frac{\text{kW}}{\text{m}^2^\circ\text{C}} \end{aligned}$$

Calculando el calor

$$W_c = 9.81 * \text{BHP} = 9.81 * 700 = 6867 \text{ kW}$$

Reemplazando se obtiene

$$\begin{aligned} Q_{P5} &= h_{cf} * A_f * (T_{sf} - T_a) + h_{cg} * A_g * (T_{sg} - T_a) \\ Q_{P5} &= 6.506 * 10^{-3} \frac{\text{kW}}{\text{m}^2^\circ\text{C}} * 76.10 \text{m}^2 * ((67.5 + 273.15)\text{K} - (33.2 + 273.15)\text{K}) \\ &\quad + 6.979 * 10^{-3} * 24 \text{m}^2 * ((81.4 + 273.15)\text{K} - (33.2 + 273.15)\text{K}) \\ Q_{P5} &= 25.055 \text{ kW} \end{aligned}$$

Reemplazando se obtiene

$$\begin{aligned} P5 &= 80 * \left( \frac{25.055 \text{ kW}}{6867 \text{ kW}} \right) \\ P5 &= 0.291\% \end{aligned}$$



Pérdida por radiación (P<sub>6</sub>)

$$P_6 = 80 * (Q_{P_6}/W_C) \dots (6)$$

Calculando : q<sub>rf</sub>

$$q_{rf} = 5.763 * 10^{-11} * \epsilon * [(T_{sf} + 273)^4 - (T_a + 273)^4]$$
$$q_{rf} = 5.763 * 10^{-11} * 0.96 * [(67.5 + 273.15)^4 - (33.2 + 273.15)^4]$$
$$q_{rf} = 0.257 \text{ kW}$$

Calculando : q<sub>rg</sub>

$$q_{rg} = 5.763 * 10^{-11} * \epsilon * [(T_{sg} + 273)^4 - (T_a + 273)^4]$$
$$q_{rg} = 5.763 * 10^{-11} * 0.96 * [(81.4 + 273.15)^4 - (33.2 + 273.15)^4]$$
$$q_{rg} = 0.386 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}$$

Calculando

$$W_C = 9.81 * \text{BHP} = 9.81 * 700 = 6867 \text{ kW}$$

Calculando el calor Q<sub>p6</sub>

$$Q_{P_6} = (q_{rf} * A_f) + (q_{rg} * A_g)$$
$$Q_{P_6} = \left(0.257 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2} * 76.10 \text{ m}^2\right) + \left(0.386 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2} * 24 \text{ m}^2\right)$$
$$Q_{P_6} = 28.82 \text{ kW}$$

Reemplazando finalmente

$$P_6 = 80 * (Q_{P_6}/W_C)$$
$$P_6 = 80 * \left(\frac{28.82 \text{ kW}}{6867 \text{ kW}}\right)$$
$$P_6 = 0.335\%$$

Cálculo de la eficiencia térmica de la caldera en régimen de llama mínima de combustión.

$$\eta = 100\% - \sum_1^6 (P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6)$$

$$\eta = 100\% - (10.84 + 6.0 + 0.045 + 1.57 + 0.291 + 0.323)\%$$

$$\eta = 80.931\%$$

#### 4.1.2 Cálculo de la eficiencia actual de la caldera pirotubular N° 04 -800 BHP

Eficiencia de caldera N° 04 de 800 BHP, sin regulación de combustión.

Tabla 11. Parámetros de combustión de caldera N° 04 en llama desarrollada al 75%

Parámetros	Símb.	unidades	valor
Presión de operación	Pop.	Psig	110
Oxígeno	O <sub>2</sub>	%	6.7
Monóxido de Carbono	CO	ppm	64
Dióxido de Carbono	CO <sub>2</sub>	%	11.36
Temperatura de humos	Tg	°C	248.3
Exceso de Aire	Ea	%	44.4
Eficiencia de Combustión	n	%	85.4
Opacidad	Op.		2

Fuente: Elaboración propia

Aplicación de NTP.350.300.2008, Método Indirecto

Pérdida por la entalpía de los gases de escape secos (P<sub>1</sub>)

$$P_1 = k * \left\{ \frac{(T_g - T_a)}{[CO_2]} \right\} \% \dots (7)$$

Constante de Siegert  $k = 0.53$  ,reemplazando se tiene

$$P_1 = 0.53 * \left\{ \frac{(248.3 - 32.2)}{[11.36]} \right\} \%$$

$$P_1 = 10.08 \%$$

Pérdida por la entalpía del vapor de agua en los gases ( $P_2$ )

$$P_2 = \frac{\{([H_2O] + 9 * [H]) * (2488 - 4,2 * T_a + 2,1 * T_g)\}}{PCS} \dots (8)$$

$$H = 10 \%$$

$$H_2O = 0\%$$

$$T_g: 248.3 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_a: 33.2^\circ\text{C}$$

$$[H_2O]: 0 \%$$

$$[H]: 10 \%$$

$$P_2 = \frac{\{(0 + 9 * [10]) * (2488 - 4,2 * (33.2) + 2,1 * (248.3))\}}{42099}$$

$$P_2 = 6.13\%$$

Pérdida por inquemados gaseosos ( $P_3$ )

$$P_3 = k_1 * \left\{ \frac{[CO]}{([CO_2] + [CO])} \right\} \dots (9)$$

Dónde  $k_1$  : 54

$$[CO_2]: 11.36 \%$$

$$[CO]: 64 \text{ ppm} = 0.0064 \%$$

$$P_3 = 54 * \left\{ \frac{[0.0064]}{([11.36] + [0.0064])} \right\} \% = 0.0304 \%$$

Pérdida por inquemados sólidos ( $P_4$ )

$$P_4 = 0.14 * B^2 + 0.08 * B + 0.07 \dots (10)$$

De tabla de índice de Bacharach:  $B=3$

$$P_4 = 0.14 * (3)^2 + 0.08 * (3) + 0.07 = 1.57\%$$

Pérdida por convección (P<sub>5</sub>)

$$P_5 = 80 * \left( \frac{Q_{P5}}{W_C} \right) \dots (11)$$

Calculando

$$h_{cf} = 1.973 * 10^{-3} * (T_{sf} - T_a)^{0.25} * (2.857 * v + 1)^{0.5}$$
$$h_{cf} = 1.973 * 10^{-3} * (68.6^\circ\text{C} - 33.2^\circ\text{C})^{0.25} * \left( 2.857 * \left( 0.3 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right) + 1 \right)^{0.5} = 6.558 * 10^{-3} \frac{\text{kW}}{\text{m}^2^\circ\text{C}}$$

Calculando

$$h_{cg} = 1.973 * 10^{-3} * (T_{sg} - T_a)^{0.25} * (2.857 * v + 1)^{0.5}$$
$$h_{cg} = 1.973 * 10^{-3} * (80.2^\circ\text{C} - 33.2^\circ\text{C})^{0.25} * \left( 2.857 * 0.3 \frac{\text{m}}{\text{s}} + 1 \right)^{0.5} = 7.039 * 10^{-3} \frac{\text{kW}}{\text{m}^2^\circ\text{C}}$$

Calculando el calor

$$W_c = 9.81 * \text{BHP} = 9.81 * 800 = 7848 \text{ kW}$$

Reemplazando se obtiene

$$Q_{P5} = h_{cf} * A_f * (T_{sf} - T_a) + h_{cg} * A_g * (T_{sg} - T_a)$$
$$Q_{P5} = 6.558 * 10^{-3} \frac{\text{kW}}{\text{m}^2^\circ\text{C}} * 84.2 \text{ m}^2 * ((68.6 + 273.15) \text{ K} - (33.2 + 273.15) \text{ K}) + 7.039$$
$$* 10^{-3} * 28 \text{ m}^2 * ((80.2 + 273.15) \text{ K} - (33.2 + 273.15) \text{ K})$$
$$Q_{P5} = 19.878 \text{ kW}$$

Reemplazando se obtiene

$$P_5 = 80 * \left( \frac{19.878 \text{ kW}}{7848 \text{ kW}} \right)$$
$$P_5 = 0.202\%$$

Pérdida por radiación (P<sub>6</sub>)

$$P_6 = 80 * (Q_{P6}/W_C) \dots (12)$$

Calculando : q<sub>rf</sub>

$$q_{rf} = 5.763 * 10^{-11} * \epsilon * [(T_{sf} + 273)^4 - (T_a + 273)^4]$$

$$q_{rf} = 5.763 * 10^{-11} * 0.96 * [(68.6 + 273.15)^4 - (33.2 + 273.15)^4]$$

$$q_{rf} = 0.267 \text{ kW}$$

Calculando :  $q_{rg}$

$$q_{rg} = 5.763 * 10^{-11} * \epsilon * [(T_{sg} + 273)^4 - (T_a + 273)^4]$$

$$q_{rg} = 5.763 * 10^{-11} * 0.96 * [(80.2 + 273.15)^4 - (33.2 + 273.15)^4]$$

$$q_{rg} = 0.375 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}$$

Calculando

$$W_c = 9.81 * \text{BHP} = 9.81 * 800 = 7848 \text{ kW}$$

Calculando el calor  $Q_{P6}$

$$Q_{P6} = (q_{rf} * A_f) + (q_{rg} * A_g)$$

$$Q_{P6} = \left(0.267 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2} * 84.2\text{m}^2\right) + \left(0.386 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2} * 28\text{m}^2\right)$$

$$Q_{P6} = 33.28 \text{ kW}$$

Reemplazando finalmente

$$P6 = 80 * (Q_{P6}/W_c)$$

$$P6 = 80 * \left(\frac{33.28 \text{ kW}}{7848 \text{ kW}}\right)$$

$$P6 = 0.339\%$$

Cálculo de la eficiencia térmica de la caldera en régimen de llama mínima de combustión.

$$\eta = 100\% - \sum_1^6 (P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6)$$

$$\eta = 100\% - (10.08 + 6.13 + 0.0304 + 1.57 + 0.202 + 0.339)\%$$

$$\eta = 81.64\%$$

### 4.1.3 Cálculo de la eficiencia actual de la caldera pirotubular N° 06 de 600 BHP.

Eficiencia de caldera N° 06 de 600 BHP, sin regulación de combustión.

Tabla 12. Parámetros de combustión de caldera N° 06 en llama desarrollada 75%

Parámetros	Símb.	unidades	valor
Presión de operación	Pop.	Psig	110
Oxígeno	O <sub>2</sub>	%	9.6
Monóxido de Carbono	CO	ppm	107
Dióxido de Carbono	CO <sub>2</sub>	%	9.05
Temperatura de humos	T <sub>g</sub>	°C	287.8
Exceso de Aire	Ea	%	79.8
Eficiencia de Combustión	n	%	80.2
Opacidad	Op.		2
Temperatura ambiente	Ta	°C	29.9

Fuente: Elaboración propia

Aplicación de NTP.350.300.2008, Método Indirecto

Pérdida por la entalpía de los gases de escape secos (P<sub>1</sub>)

$$P_1 = k * \left\{ \frac{(T_g - T_a)}{[CO_2]} \right\} \% \dots (13)$$

Constante de Siegert  $k = 0.53$  ,reemplazando se tiene

$$P_1 = 0.53 * \left\{ \frac{(287.8 - 29.9)}{[9.05]} \right\} \%$$

$$P_1 = 15.103 \%$$

Pérdida por la entalpía del vapor de agua en los gases (P<sub>2</sub>)

$$P_2 = \frac{\{([H_2O] + 9 * [H]) * (2488 - 4,2 * T_a + 2,1 * T_g)\}}{PCS} \dots (14)$$

$$H = 10 \%$$

$$H_2O = 0\%$$

$$T_g: 287.8 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_a: 29.9^\circ\text{C}$$

[H<sub>2</sub>O]: 0 %

[H]: 10 %

$$P_2 = \frac{\{(0 + 9 * [10]) * (2488 - 4,2 * (29.9) + 2,1 * (287.8))\}}{42099}$$

$$P_2 = 6.34\%$$

Pérdida por inquemados gaseosos (P<sub>3</sub>)

$$P_3 = k_1 * \left\{ \frac{[CO]}{([CO_2] + [CO])} \right\} \dots (15)$$

Dónde k<sub>1</sub> : 54

[CO<sub>2</sub>]: 9.05 %

[CO]: 107 ppm = 0.0107 %

$$P_3 = 54 * \left\{ \frac{[0.0107]}{([9.05] + [0.0107])} \right\} \% = 0.063 \%$$

Pérdida por inquemados sólidos (P<sub>4</sub>)

$$P_4 = 0.14 * B^2 + 0.08 * B + 0.07 \dots (16)$$

De tabla de índice de Bacharach: B=3

$$P_4 = 0.14 * (3)^2 + 0.08 * (3) + 0.07 = 1.57\%$$

Pérdida por convección (P<sub>5</sub>)

$$P_5 = 80 * \left( \frac{Q_{P5}}{W_C} \right) \dots (17)$$

Calculando

$$h_{cf} = 1.973 * 10^{-3} * (T_{sf} - T_a)^{0.25} * (2.857 * v + 1)^{0.5}$$

$$h_{cf} = 1.973 * 10^{-3} * (62.3^\circ\text{C} - 29.9^\circ\text{C})^{0.25} * \left( 2.857 * \left( 0.3 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right) + 1 \right)^{0.5} = 6.414 * 10^{-3} \frac{\text{kW}}{\text{m}^2^\circ\text{C}}$$

Calculando

$$h_{cg} = 1.973 * 10^{-3} * (T_{sg} - T_a)^{0.25} * (2.857 * v + 1)^{0.5}$$
$$h_{cg} = 1.973 * 10^{-3} * (74.2^{\circ}\text{C} - 29.9^{\circ}\text{C})^{0.25} * \left(2.857 * 0.3 \frac{\text{m}}{\text{s}} + 1\right)^{0.5}$$
$$= 6.936 * 10^{-3} \frac{\text{kW}}{\text{m}^2^{\circ}\text{C}}$$

Calculando el calor

$$W_c = 9.81 * \text{BHP} = 9.81 * 600 = 5886 \text{ kW}$$

Reemplazando se obtiene

$$Q_{P5} = h_{cf} * A_f * (T_{sf} - T_a) + h_{cg} * A_g * (T_{sg} - T_a)$$
$$Q_{P5} = 6.414 * 10^{-3} \frac{\text{kW}}{\text{m}^2^{\circ}\text{C}} * 68.4 \text{ m}^2 * ((62.3 + 273.15)\text{K} - (29.9 + 273.15)\text{K})$$
$$+ 6.936 * 10^{-3} * 17.1 \text{ m}^2 * ((74.2 + 273.15)\text{K} - (33.2 + 273.15)\text{K})$$
$$Q_{P5} = 19.077 \text{ kW}$$

Reemplazando se obtiene

$$P5 = 80 * \left(\frac{19.077 \text{ kW}}{5886 \text{ kW}}\right)$$
$$P5 = 0.259\%$$

Pérdida por radiación (P6)

$$P6 = 80 * (Q_{P6}/W_c) \dots (18)$$

Calculando :  $q_{rf}$

$$q_{rf} = 5.763 * 10^{-11} * \epsilon * [(T_{sf} + 273)^4 - (T_a + 273)^4]$$
$$q_{rf} = 5.763 * 10^{-11} * 0.96 * [(62.3 + 273.15)^4 - (29.9 + 273.15)^4]$$
$$q_{rf} = 0.233 \text{ kW}$$



Calculando :  $q_{rg}$

$$q_{rg} = 5.763 * 10^{-11} * \epsilon * \left[ (T_{sg} + 273)^4 - (T_a + 273)^4 \right]$$

$$q_{rg} = 5.763 * 10^{-11} * 0.96 * [(74.2 + 273.15)^4 - (29.9 + 273.15)^4]$$

$$q_{rg} = 0.338 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}$$

Calculando

$$W_c = 9.81 * \text{BHP} = 9.81 * 600 = 5886 \text{ kW}$$

Calculando el calor  $Q_{P6}$

$$Q_{P6} = (q_{rf} * A_f) + (q_{rq} * A_g)$$

$$Q_{P6} = \left( 0.233 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2} * 68.4 \text{m}^2 \right) + \left( 0.338 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2} * 17.1 \text{m}^2 \right)$$

$$Q_{P6} = 21.717 \text{ kW}$$

Reemplazando finalmente

$$P6 = 80 * (Q_{P6}/W_c)$$

$$P6 = 80 * \left( \frac{21.717 \text{ kW}}{5886 \text{ kW}} \right)$$

$$P6 = 0.295\%$$

Cálculo de la eficiencia térmica de la caldera en régimen de llama mínima de combustión.

$$\eta = 100\% - \sum_1^6 (P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6)$$

$$\eta = 100\% - (15.103 + 6.34 + 0.063 + 1.57 + 0.259 + 0.295)\%$$

$$\eta = 76.37\%$$

Las eficiencias actuales obtenidas son:

Tabla 13. Resumen de eficiencias térmicas antes de la regulación

Calderas	Calderas N°03	Calderas N°04	Caldera N° 06
Eficiencias	80.93%	81.64	76.37 %

Fuente. Elaboración propia

### Descripción

Como se observa, las eficiencias energéticas de las calderas son bajas comparadas con los valores estándares recomendadas por los manuales técnicos de operación, que indican un valor recomendable de 85 %. Sin embargo las causales de baja eficiencia se orienta a un excedente de exceso de aire presente en los gases de combustión, como se puede observar para la Caldera N°03 , su exceso de aire equivale a 78.3%, un valor sobre elevado , para la Caldera N° 04 un valor de 44.4% y para la caldera N° 06 79.8% de exceso de aire a los que también corresponde una temperatura de escape de gases de combustión de equivaler a 219.4 °C, 248.3 °C y 287.8 °C , respectivamente como se indican en cada resultado de las mediciones, y que su valor se relaciona directamente a la eficiencia de combustión.

A continuación, se extraen los parámetros principales de combustión de las calderas N° 03, N° 04 y N° 06.

Tabla 14. Datos comparados de exceso de aire y Temp de gases de combustión

Parámetros/Calderas	Calderas N°03	Calderas N°04	Caldera N° 06
Temp. Gases comb.	219.4°C	248.3°C	287.8°C
Exceso de Aire	78.3%	44.4%	79.8%
Eficiencia térmica	80.93%	81.64	76.37 %

Fuente: Elaboración propia

#### **4.2.4. Interpretación de resultado**

Caldera N° 03: presenta una eficiencia térmica baja equivalente a 80.93% con temperatura de gases de escape moderada con valor de 219.4°C , sin embargo el exceso de aire de 78.3% es muy elevado , este valor produce que los gases de combustión tengan tendencia a enfriarse a la salida por la relación Aire/combustible elevado que se obtiene a la entrada de la caldera , por lo que es necesario regularla a la entrada de la cámara de combustión a porcentajes alrededor de 40% para el tipo de combustible que se utiliza Petróleo industrial 6.

Caldera N° 04: Presenta una eficiencia baja de 81.64% y superior a la caldera anterior, pero su temperatura de gases es elevada alrededor de 248.3 % considerando que su exceso de aire es adecuado 44.4%, sin embargo, los datos indican que existe problemas en la mezcla u atomización del combustible, por lo que el color de llama que se muestra en la ficha cualitativa corresponde a un color anaranjado, señal que indica problemas de mezcla y atomizado de aire y combustible.

Caldera N° 06: Presenta una eficiencia muy baja de 76.37 % e inferior en comparación a las demás calderas, y su temperatura de gases sobrepasa los 287°C dándole la condición de una operación crítica respecto a la combustión, además su exceso de aire equivale a 79.8% siendo un valor superior al recomendado (40 a 44%), y una coloración de llama de combustión anaranjado (al 100% de llama).

#### **4.3 Regulación del desarrollo de la llama de combustión (segundo objetivo)**

A partir de los datos obtenidos en la primera medición de combustión, se procede a realizar las maniobras basados en la longitud de llama de combustión de las calderas N° 03 de 700 BHP, la caldera N° 04 de 800 BHP y la caldera N° 06 de 600 BHP, basado en la modulación del exceso de aire, revisión y limpieza de tobera quemador e inspección de entrada a la cámara, luego los valores referenciales tomados corresponden a longitud de llama para mediciones se determinó el régimen de combustión a:

Fuego mínimo; Fuego al 25%; Fuego al 50%; Fuego al 75%; Fuego al 100%.

Tabla 15. Caracterización de la llama de combustión por color según el régimen

Caracterización de color de llama de combustión a diferentes longitudes de llama						
Llama de combustión	Tamaño de Llama	Color de Llama	CALDERA 03	CALDERA 04	CALDERA 06	
	Fuego mínimo	Rojizo				x
		Anaranjado	x			
		Amarillo		x		
	Fuego al 25%	Rojizo				
		Anaranjado	x	x	x	
		Amarillo				
	Fuego al 50%	Rojizo				x
		Anaranjado	x	x		
		Amarillo				
	Fuego al 75%	Rojizo	x			x
		Anaranjado		x		
		Amarillo				x
	Fuego al 100%	Rojizo				
		Anaranjado		x	x	
		Amarillo	x			

Fuente: Elaboración propia

Tabla 16. Leyenda de interpretación de la llama de combustión por color según el régimen

	Deficiente mala atomización, exceso combustible
	Medio baja relación de mezcla turbulencia deficiente o relación A/C deficiente
	Alta, relación Aire/Comb adecuado, buen a mezcla y atomización

Fuente: Elaboración propia

#### **4.3.1 Inspección de las calderas**

- **Maniobras de regulación en caldera 700 BHP N° 03**

Durante la prueba preliminar se observó emisiones de humos a llama baja y un elevado exceso de aire en rangos de llama media hacia alta, para la corrección y regulación de la combustión se reajusto la tuerca de la rótula para reducir el juego mecánico, determinando que la rótula presenta desgaste, se incrementó la presión de petróleo de 40 psi a 50psi regulándose el perno de leva.

- **Maniobras de regulación en caldera 800 BHP N° 04**

En la revisión y pruebas se detectó formación de humos en régimen de llama media al 50% y exceso de aire, por lo que se procedió a regularla alcanzando una formación de llama equilibrada con respecto a las mediciones de gases que se realizó hasta poner a punto la combustión.

- **Maniobras de regulación en caldera 600 BHP, N° 06**

Durante la revisión y pruebas se observó que la caldera presenta elementos de otro quemador marca Distral (boquilla y accesorio de modulación)), acondicionados sobre el cuerpo de un quemador de copa rotativa del equipo original. Durante las pruebas se observó presencia de humos a llama baja y un elevado exceso de aire a rangos de llama media a alta, para las correcciones se reajusto la abertura inicial de la compuerta de aire y se reajusta la tuerca de la rótula para reducir el juego mecánico por estar en estado suelto o flojo, se incrementó la presión de inyección de petróleo de 40 psi a 50 psi y se regulo los pernos de la leva.

Se procedió a la regulación de entrada del aire para la combustión en la caldera N° 03, N° 04 y N° 06, en base a la modulación del tamaño de desarrollo de la llama de combustión, considerando la operación en llama mínima, llama al 25, 50,75 y 100% de desarrollo, obteniéndose los siguientes resultados.

### Mediciones después de los ajustes

Tabla 17. Parámetros de combustión de caldera N° 03 de 700 BHP

Caldera 700 BHP N° 03 parámetro	Regulación de tamaño de llama de combustión				
	Mínimo	25%	50%	75%	100%
Temperatura gases de combustión	145.6	171.3	197.3	212.3	219.4
Oxígeno	5.6	4.9	6.3	9.7	9.5
Monóxido de carbono	85	70	67	68	76
Dióxido de carbono	12.24	12.79	11.68	8.97	9.13
eficiencia de combustión	90.3	89.4	87.7	84.7	84.4
exceso de aire	34.4	28.8	40.6	81.3	78.3
temperatura de ambiente	33.2	33.1	33.2	32.8	33.1

Fuente: Elaboración propia

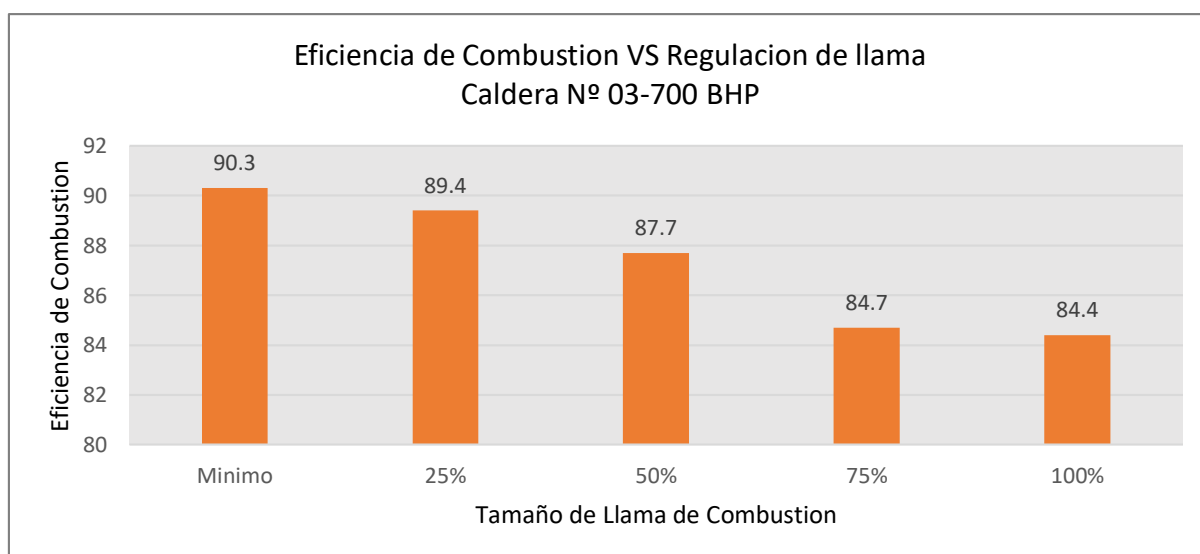


Figura 5. Eficiencia de combustión y regulación de llama en caldera de 700 BHP

Fuente: Elaboración propia

**Descripción:** El tamaño adecuado de longitud de llama está al 75% conservando un valor de eficiencia de combustión de 84.7% que es adecuado para el tipo de combustible Petróleo industrial 6.

Tabla 18. Parámetros de combustión de caldera N° 04 de 800 BHP

Caldera 800 BHP N° 04 parámetro	Regulación de tamaño de llama de combustión				
	Mínimo	25%	50%	75%	100%
Temperatura gases de combustión	166.4	212	236.6	235.4	248.3
Oxígeno	3.8	4.7	8.3	7.7	6.7
Monóxido de carbono	78	57	57	58	64
Dióxido de carbono	13.67	12.95	10.08	10.56	11.36
eficiencia de combustión	90	87.9	84.8	85.2	85.4
exceso de aire	20.9	27.3	61.9	54.9	44.4
temperatura de ambiente	33.5	34.6	37.4	36.5	38.4

Fuente: Elaboración propia

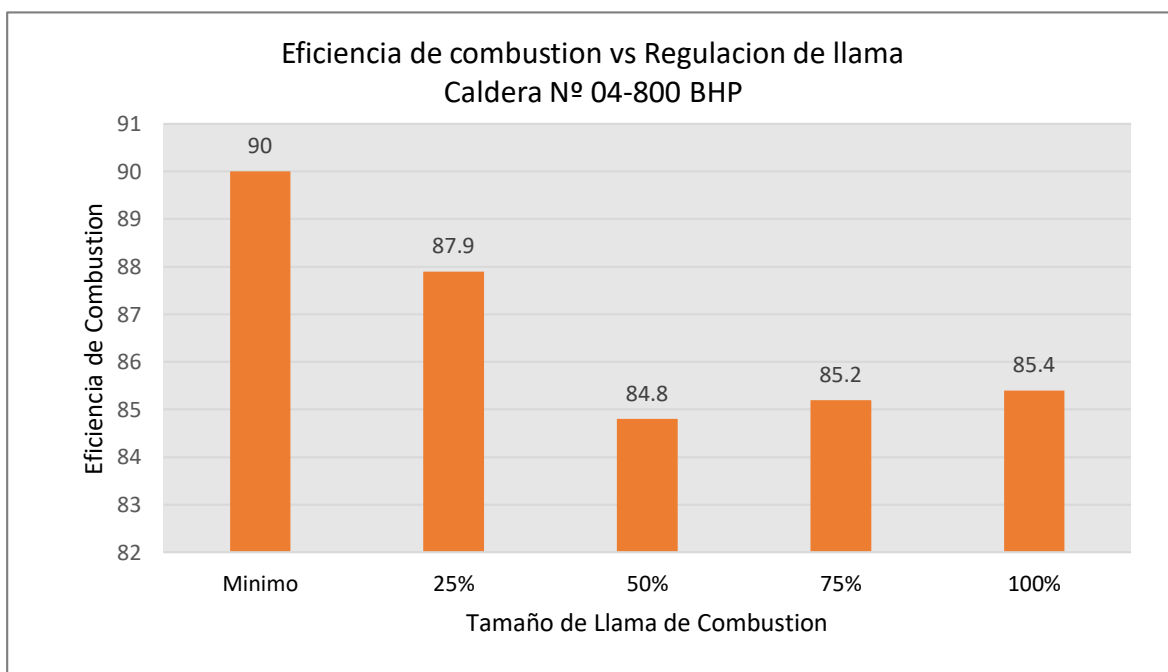


Figura 6. Eficiencia de combustión y regulación de llama en caldera de 800 BHP

Fuente: Elaboración propia

**Descripción:** El tamaño adecuado de longitud de llama está al 75% conservando un valor de eficiencia de combustión de 85.2% que es adecuado para el tipo de combustible Petróleo residual 6.

Tabla 19. Parámetros de combustión de caldera N° 06 de 600 BHP

Caldera N° 06 parámetro	Regulación de tamaño de llama de combustión				
	Mínimo	25%	50%	75%	100%
Temperatura gases de combustión	247.1	279.4	281.8	288.7	287.8
Oxígeno	7.1	10.1	10.1	9.6	9.6
Monóxido de carbono	53	75	130	110	107
Dióxido de carbono	11.04	8.65	8.65	9.05	9.05
eficiencia de combustión	84.8	80	79.9	80.2	80.2
exceso de aire	48.4	87.8	87.7	79.8	79.8
temperatura de ambiente	30.3	30.1	30.4	31	29.9

Fuente: Elaboración propia

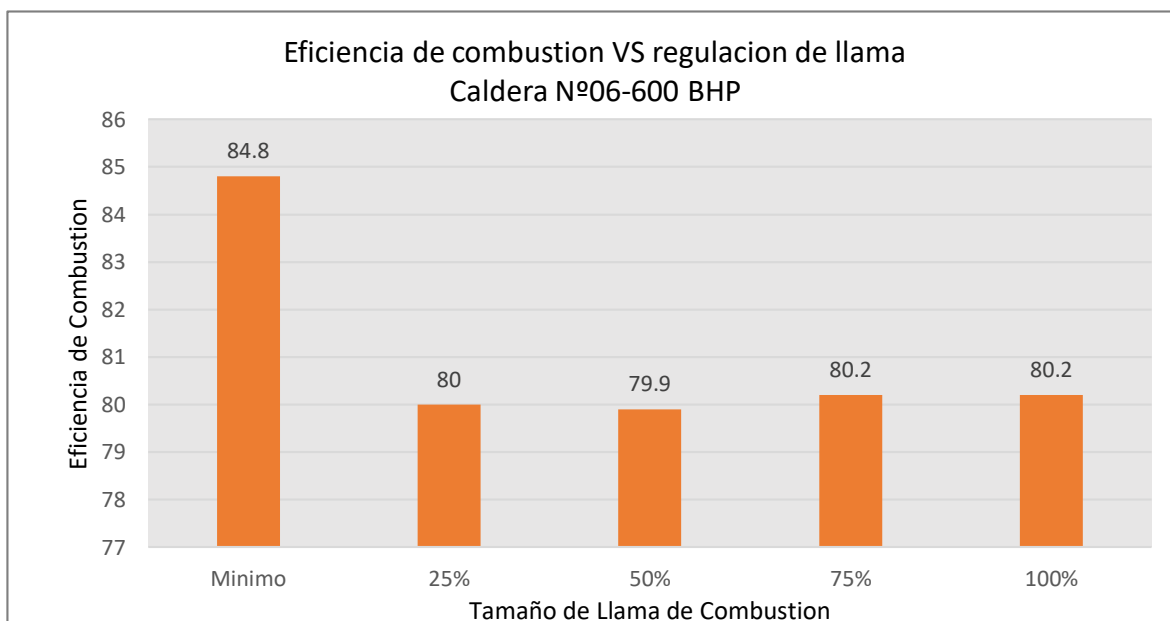


Figura 7. Eficiencia de combustión y regulación de llama en caldera de 600 BHP

.Fuente: Elaboración propia.

**Descripción:** El tamaño adecuado de longitud de llama está al 75% conservando un valor de eficiencia de combustión de 80.2 % relativamente bajo que para el tipo de combustible Petróleo residual 6.



#### 4.4 Registro de los parámetros posterior a la regulación de combustión (objetivo 3)

Aplicación de la NTP.250.300.2008. Determinación de eficiencia de combustión mediante método indirecto.

Tabla 20. Datos de caldera pirotubular N° 03 de 700 BHP, posterior a la regulación

Parámetros de combustión	Símb.	Unidades	Mínimo	25%L	50%L	75%L	100%L
Calor sensible en gases	P1	%	4.88	5.73	7.24	9.35	9.20
Vapor de agua	P2	%	5.67	5.80	5.91	5.26	6.01
Inquem. gaseosos	P3	%	0.044	0.047	0.056	0.043	0.051
Inquem. sólidos	P4	%	2.63	2.63	1.57	1.57	1.57
Convección	P5	%	0.27	0.20	0.20	0.20	0.20
Radiación	P6	%	0.31	0.32	0.31	0.31	0.36
Eficiencia Caldera	n	%	86.19	85.27	84.71	83.26	82.60

Fuente. Elaboración propia

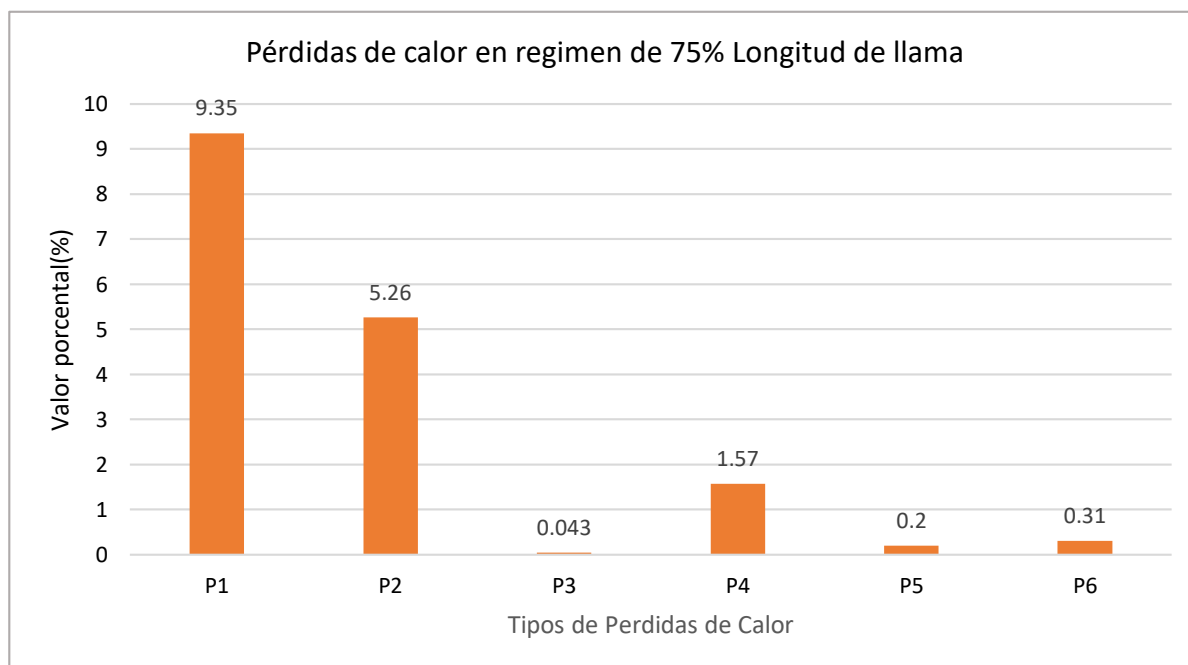


Figura 8. Pérdidas de calor según método indirecto en caldera de 700 BHP

Fuente: Elaboración propia

**Descripción:** Con respecto a los regímenes de llama de combustión, se acepta el valor al 75% de longitud, considerando que la extensión total de llama al 100% no es recomendable para las operaciones de una caldera, sin embargo, operar por debajo de 75% de longitud de llama ocasionaría problemas de descompensación de flujo de calor, pérdida de potencia térmica de la caldera.

Tabla 21. Datos de caldera pirotubular N° 04 de 800 BHP, posterior a la regulación.

Parámetros de combustión	Símb.	Unidades	Mínimo	25%L	50%L	75%L	100%L
Calor sensible en gases	P1	%	4.73	5.04	7.12	9.31	10.4
Vapor de agua	P2	%	5.23	5.25	5.41	5.30	5.64
Inquemados gaseosos	P3	%	0.037	0.03	0.03	0.04	0.04
Inquemados Solidos	P4	%	1.57	1.57	2.63	1.57	2.63
Convección	P5	%	0.29	0.29	0.32	0.36	0.28
Radiación	P6	%	0.24	0.30	0.33	0.34	0.37
Eficiencia Caldera	n	%	87.90	87.52	84.16	83.08	80.64

Fuente. Elaboración propia

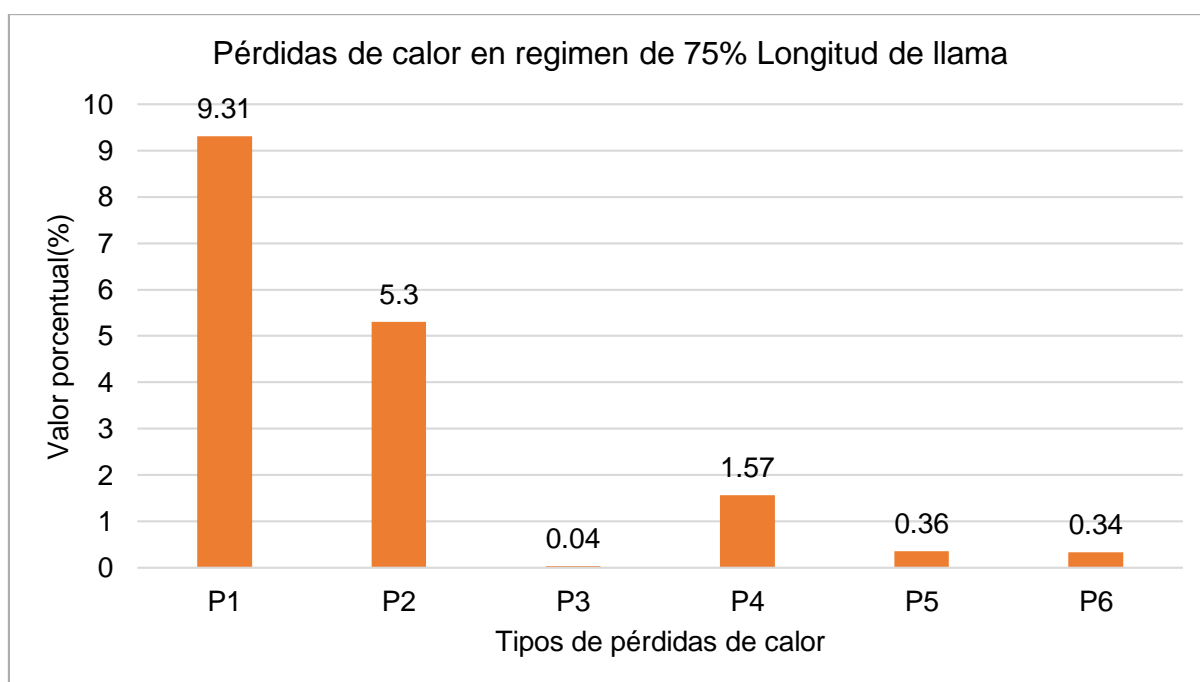


Figura 9. Pérdidas de calor según método indirecto en caldera de 800 BHP

Fuente: Elaboración propia.

**Descripción:** Respecto a los regímenes de llama de combustión, se acepta el valor al 75% de longitud, considerando que la extensión total de llama al 100% no es recomendable para las operaciones de una caldera, sin embargo, operar por debajo de 75% de longitud de llama ocasionaría problemas de descompensación de flujo de calor, pérdida de potencia térmica de la caldera.

Tabla 22. Datos de Caldera pirotubular N° 06 de 600 BHP, posterior a la regulación.

Parámetros de combustión	Símb.	Unidades	Mínimo	25%L	50%L	75%L	100%L
Calor sensible en gases	P1	%	4.13	4.68	5.27	9.43	10.2
Vapor de agua	P2	%	5.6	5.64	5.93	5.87	5.64
Inquemados gaseosos	P3	%	0.03	0.04	0.04	0.043	0.046
Inquemados Sólidos	P4	%	1.57	2.63	2.63	2.63	2.63
Convección	P5	%	0.28	0.28	0.32	0.27	0.29
Radiación	P6	%	0.34	0.37	0.38	0.38	0.39
Eficiencia Caldera	n	%	88.05	86.36	85.36	81.37	80.80

Fuente. Elaboración propia

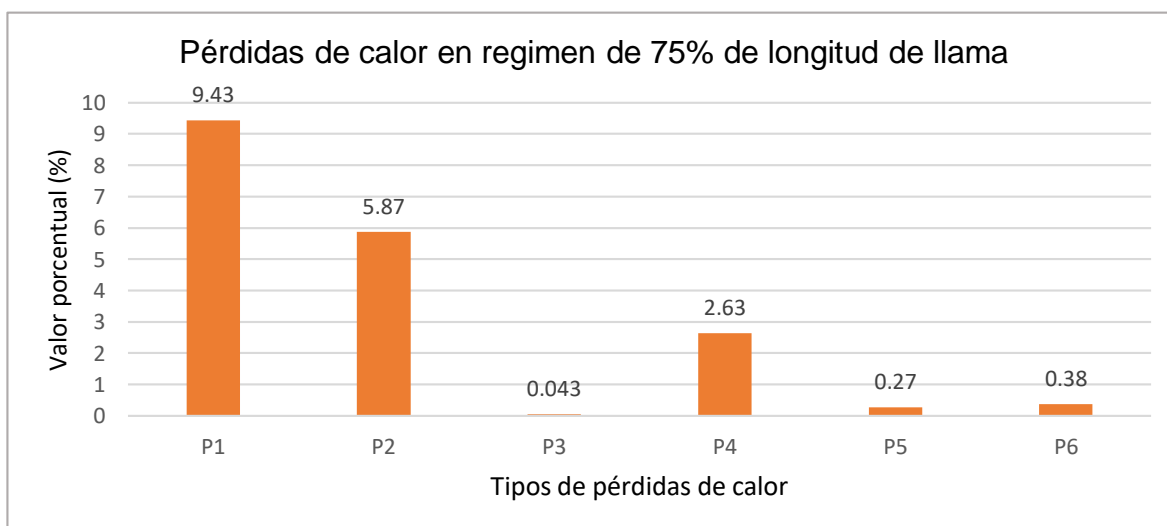


Figura 10. Pérdidas de calor según método indirecto en caldera de 600 BHP.

Fuente: elaboración propia

**Descripción:** Con respecto a los regímenes de llama de combustión, se acepta el valor al 75% de longitud, considerando que la extensión total de llama al 100% no es recomendable para las operaciones de una caldera, sin embargo, operar por debajo

de 75% de longitud de llama ocasionaría problemas de descompensación de flujo de calor, pérdida de potencia térmica de la caldera.

#### 4.5 Análisis de impacto ambiental

Para llevar un control de emisiones de gases de combustión se utilizó la NTP.350.301.2009, Estándares de eficiencia térmica (combustible/vapor) y etiquetado.

Límites máximos permisibles (LMP) de emisiones gaseosas y particulares.

Tabla 23. Emisiones de CO en ppm para las calderas pirotubulares

Calderas	Fuego min.	25%	50%	75%	100%
800 BHP	80	63	80	76	81
700 BHP	78	57	57	58	64
600 BHP	53	75	130	110	107

Fuente. Elaboración propia

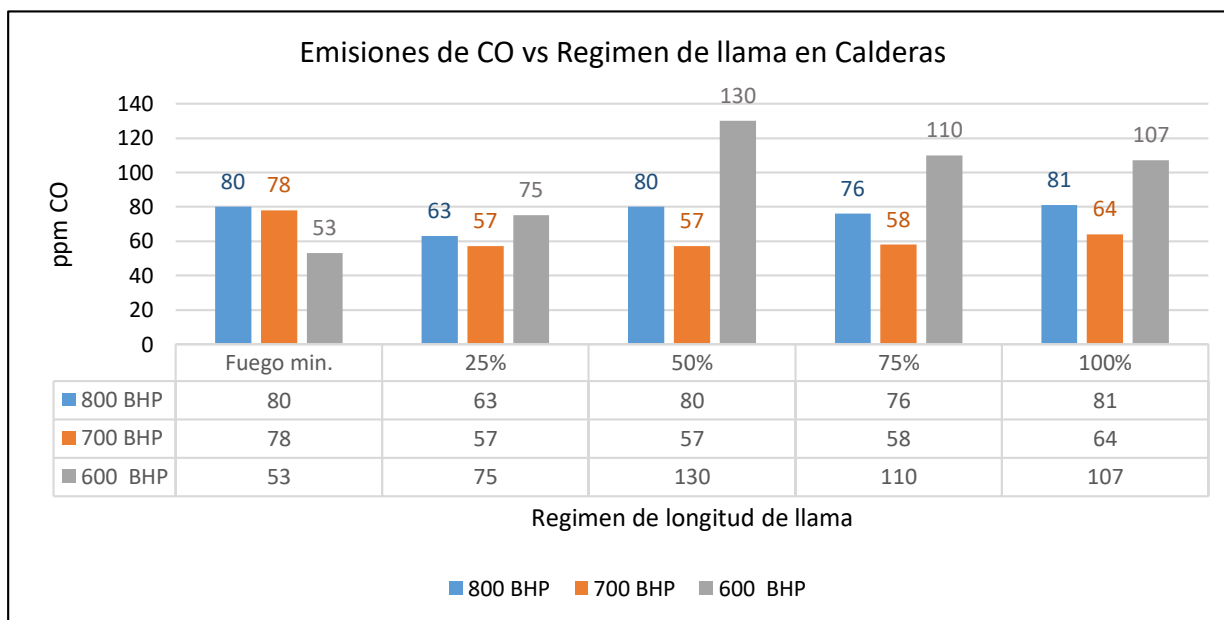


Figura 11. Emisiones de CO para cada régimen de llama de combustión

Fuente: Elaboración propia

**Descripción:** Del grafico se tiene que las emisiones más altas corresponden al régimen de llama al 50% sin embargo para el tamaño de llama al 75% se obtiene 110 ppm correspondiendo un valor que se aproxima a límite máximo permisible según NTP 300.3051.2009.

### **Cálculo de las equivalencias de emisiones de ppm a mg/Nm<sup>3</sup>**

#### **Caldera Nº 03 de 700 BHP**

Cálculo a fuego mínimo

$$80\text{ppm} * \frac{1,25 \frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3}}{1 \text{ ppm}} = 100 \frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3}$$

Cálculo al 25% de longitud de llama

$$63\text{ppm} * \frac{1,25 \frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3}}{1 \text{ ppm}} = 78 \frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3}$$

Cálculo al 50% de longitud de llama

$$80\text{ppm} * \frac{1,25 \frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3}}{1 \text{ ppm}} = 100 \frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3}$$

Cálculo al 75 % de longitud de llama

$$76\text{ppm} * \frac{1,25 \frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3}}{1 \text{ ppm}} = 95 \frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3}$$

Cálculo al 100 % de longitud de llama

$$81 \text{ ppm} * \frac{1,25 \frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3}}{1 \text{ ppm}} = 101.25 \frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3}$$

#### **Caldera Nº 04 de 800 BHP**

Cálculo a fuego mínimo

$$78\text{ppm} * \frac{1,25 \frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3}}{1 \text{ ppm}} = 97.5 \frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3}$$

Cálculo al 25% de longitud de llama

$$57\text{ppm} * \frac{1,25 \frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3}}{1 \text{ ppm}} = 71.25 \frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3}$$

Cálculo al 50% de longitud de llama

$$57\text{ppm} * \frac{1,25 \frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3}}{1 \text{ ppm}} = 71.25 \frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3}$$

Cálculo al 75 % de longitud de llama

$$58\text{ppm} * \frac{1,25 \frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3}}{1 \text{ ppm}} = 72.5 \frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3}$$

Cálculo al 100 % de longitud de llama

$$64 \text{ ppm} * \frac{1,25 \frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3}}{1 \text{ ppm}} = 80 \frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3}$$

### **Caldera Nº 06 de 600 BHP**

Cálculo a fuego mínimo

$$53\text{ppm} * \frac{1,25 \frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3}}{1 \text{ ppm}} = 66.25 \frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3}$$

Cálculo al 25% de longitud de llama

$$75\text{ppm} * \frac{1,25 \frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3}}{1 \text{ ppm}} = 93.75 \frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3}$$

Cálculo al 50% de longitud de llama

$$130\text{ppm} * \frac{1,25 \frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3}}{1 \text{ ppm}} = 162.5 \frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3}$$

Cálculo al 75 % de longitud de llama

$$110 \text{ ppm} * \frac{1,25 \frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3}}{1 \text{ ppm}} = 137.5 \frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3}$$

Cálculo al 100 % de longitud de llama

$$107 \text{ ppm} * \frac{1,25 \frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3}}{1 \text{ ppm}} = 133.75 \frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3}$$

Tabla 24. Datos de equivalencia de emisiones de CO en mg/Nm3 según NTP. 350.301.2009

Caldera	Fuego min.	25%	50%	75%	100%
Nº 700 BHP	100	78	100	95	101.25
Nº800 BHP	97.5	71.25	71.25	72.5	80
Nº600 BHP	66.25	93.75	162.5	137.5	133.75
NTP.350.301.2009	350	350	350	350	350

Fuente: Elaboración propia

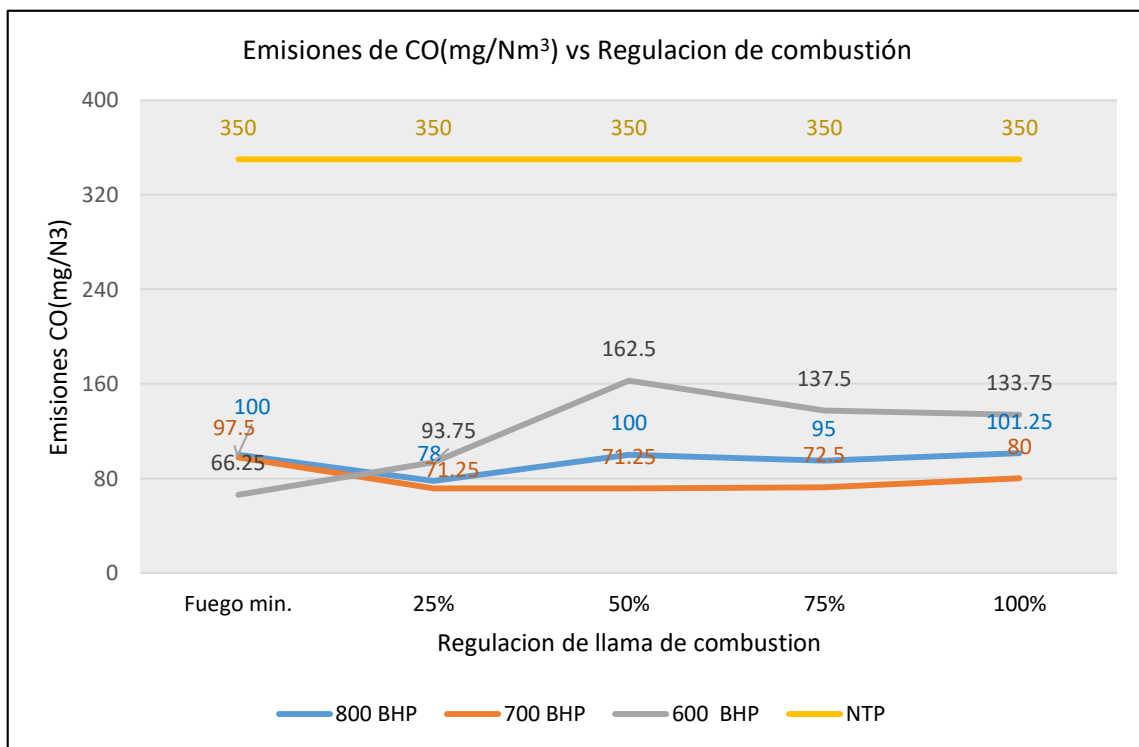


Figura 12. Emisiones de CO en mg/Nm3 comparado con régimen de llama y NTP.350.301.2009.

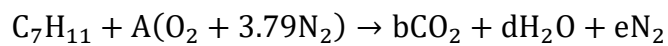
Fuente: Elaboración propia

**Descripción:** De los resultados obtenidos la caldera N<sup>a</sup> 06 de 600 BHP presentó las condiciones más críticas en cuanto a emisiones de monóxido de carbono, sin embargo, el resultado obtenido se mantiene dentro de los límites máximos permisibles para emisiones de calderas según la NTP. 350.301.2009.

#### 4.6 Análisis económico de la regulación

##### Caldera N<sup>o</sup> 03 de 700 BHP

##### Balance estequiométrico de combustión



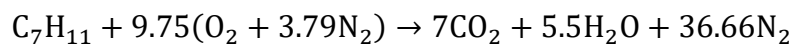
Carbono:  $7 = b \rightarrow b = 7$

Hidrógeno:  $11 = 2d \rightarrow d = 5.5$

Oxígeno:  $2A = 2b + d \rightarrow 2A = 2(7) + 5.5 \rightarrow A = 9.75$

Nitrógeno:  $2 * 3.76 * A = 2e \rightarrow 2e = 2 * 3.76 * 9.75 \rightarrow e = 36.66$

Reemplazando se tiene

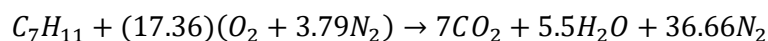
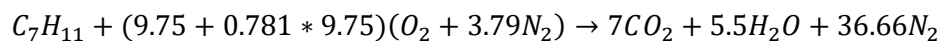


##### Cálculo de relación aire combustible teórico o estequiométrico

$$\text{Relacion } \frac{A}{C} = \frac{9.75 * (1 + 3.79) * 28.97}{7 * 12 + 11 * 1} = 14.152 \frac{\text{Kg aire}}{\text{Kg comb}}$$

##### Cálculo de relación de aire/combustible antes de la regulación

Antes de la regulación la caldera tenía 78.1% de exceso de aire, según dato de operador, ahora se estimará la nueva relación aire/combustible.

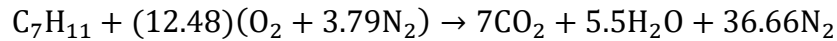
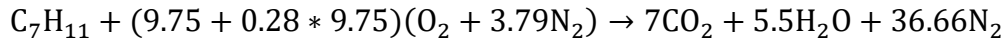


$$\text{Relacion } \frac{A}{C} = \frac{17.36(1 + 3.79) * 28.97}{7 * 12 + 11 * 1} = 25.357 \frac{\text{Kg aire}}{\text{Kg comb}}$$



### **Cálculo de la relación de aire/combustible posterior a la regulación**

Del analizador de gases en el régimen de 75% de tamaño de llama se obtiene 28.1% de exceso de aire.



$$\text{Relacion } \frac{A}{C} = \frac{12.48(1 + 3.79) * 28.97}{7 * 12 + 11 * 1} = 18.229 \frac{\text{Kg aire}}{\text{Kgcomb}}$$

En la regulación de combustión se redujo el consumo de 150 Gal/h a 146 Gal/h un costo de combustible, 8.67 Soles/Galón, se tiene:

$$\text{Ahorro económico diario} = \left(4 \frac{\text{Galon}}{\text{h}}\right) * 8.67 \frac{\text{Soles}}{\text{Galon}} * 14 \frac{\text{horas}}{\text{dia}} = 485 \frac{\text{Soles}}{\text{dia}}$$

Considerando 6 meses de operación al año

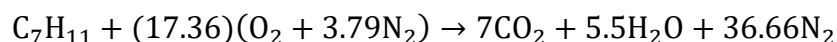
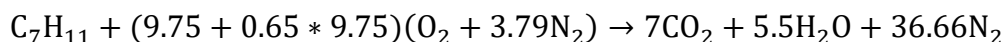
$$\text{Ahorro económico anual} = 485 \frac{\text{Soles}}{\text{dia}} * \frac{25 \text{ dias}}{\text{mes}} * \frac{6 \text{ meses}}{\text{año}} = 72750 \frac{\text{Soles}}{\text{año}}$$

Como se observa al regular el exceso de aire desde 78.1 % hasta 28.1% se reduce también el consumo de combustible de 150 Gal /h hasta 146 Gal/h para equilibrar la combustión se obtiene un ahorro económico de 72 750 soles/año.

### **Caldera Nº 04 de 800 BHP**

#### **Cálculo de relación de aire/combustible antes de la regulación**

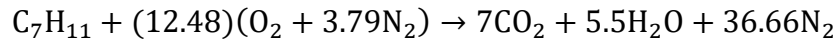
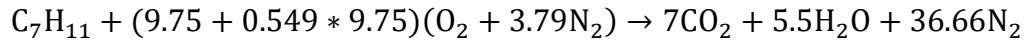
Antes de la regulación la caldera tenía 65 % de exceso de aire, según dato de operador de caldera, ahora se estimará la nueva relación aire/combustible.



$$\text{Relacion } \frac{A}{C} = \frac{16.08(1 + 3.79) * 28.97}{7 * 12 + 11 * 1} = 23.488 \frac{\text{Kg aire}}{\text{Kgcomb}}$$

## Cálculo de la relación de aire/combustible posterior a la regulación

Del analizador de gases en el régimen de 75% de tamaño de llama se obtiene 54.9% de exceso de aire. (ver anexo)



$$\text{Relación } \frac{A}{C} = \frac{15.10(1 + 3.79) * 28.97}{7 * 12 + 11 * 1} = 22.056 \frac{\text{Kg aire}}{\text{Kgcomb}}$$

En la regulación de combustión se redujo el consumo de 142 Gal/h a 137 Gal/h con un costo de combustible, 8.67 Soles/Galón, se tiene:

$$\text{Ahorro económico diario} = \left(5 \frac{\text{Galon}}{\text{h}}\right) * 8.67 \frac{\text{Soles}}{\text{Galon}} * 10 \frac{\text{horas}}{\text{dia}} = 433.5 \frac{\text{Soles}}{\text{dia}}$$

Considerando 6 meses de operación al año

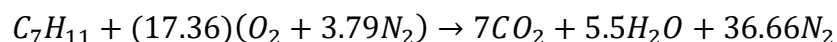
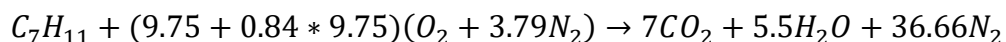
$$\text{Ahorro económico anual} = 433.5 \frac{\text{Soles}}{\text{dia}} * \frac{25 \text{ dias}}{\text{mes}} * \frac{6 \text{ meses}}{\text{año}} = 65\,025.00 \frac{\text{Soles}}{\text{año}}$$

Como se observa al regular el exceso de aire desde 65 % hasta 54.9 % se reduce también el consumo de combustible de 142 Gal /h hasta 137 Gal/h para equilibrar la combustión y se obtiene un ahorro económico de 65 025.00 soles/año.

## Caldera Nº 06 de 600 BHP

### Cálculo de relación de aire/combustible antes de la regulación

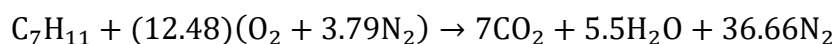
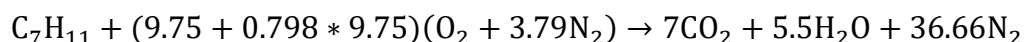
Antes de la regulación la caldera tenía 84 % de exceso de aire, según dato de operador de caldera, ahora se estimará la nueva relación aire/combustible.



$$\text{Relacion } \frac{A}{C} = \frac{17.94(1 + 3.79) * 28.97}{7 * 12 + 11 * 1} = 26.204 \frac{\text{Kg aire}}{\text{Kgcomb}}$$

## Cálculo de la relación de aire/combustible posterior a la regulación

Del analizador de gases en el régimen de 75% de tamaño de llama se obtiene 79.8% de exceso de aire. (ver anexo)



$$\text{Relación } \frac{A}{C} = \frac{17.53(1 + 3.79) * 28.97}{7 * 12 + 11 * 1} = 25.606 \frac{\text{Kg aire}}{\text{Kg comb}}$$

En la regulación de combustión se redujo el consumo de 130 Gal/h a 127 Gal/h con un costo de combustible, 8.67 Soles/Galón, se tiene:

$$\text{Ahorro económico diario} = \left(3 \frac{\text{Galon}}{\text{h}}\right) * 8.67 \frac{\text{Soles}}{\text{Galon}} * 11 \frac{\text{horas}}{\text{dia}} = 286.11 \frac{\text{Soles}}{\text{dia}}$$

Considerando 6 meses de operación al año

$$\text{Ahorro económico anual} = 286.11 \frac{\text{Soles}}{\text{dia}} * \frac{25 \text{ dias}}{\text{mes}} * \frac{6 \text{ meses}}{\text{año}} = 42\,916.00 \frac{\text{Soles}}{\text{año}}$$

Como se observa al regular el exceso de aire desde 84 % hasta 79.8 % se reduce también el consumo de combustible de 130 Gal /h hasta 127 Gal/h para equilibrar la combustión y se obtiene un ahorro económico de 42 916.00.00 soles/año.

## Resumen de cálculos de costos de operación

Haciendo cálculos para las calderas N° 04 de 700 BHP y Caldera N°06 de 600 BHP se tiene el siguiente cuadro resumen.

Tabla 25. Resumen de cálculos de balance de energía y ahorro por ajuste de combustión.

Calderas	Consumo (Gal/h) PI N°6		Exceso Aire (%)		Ahorro anual(S/)
	Antes Reg	Desp Reg	Antes Reg.	Desp. Reg.	Desp. Regul.
N° 03- 800 BHP	150	146	48.1	28.1	72 750.00
N° 04 -700 BHP	142	137	65	54.9	65 025.00
N° 06- 600 BHP	130	127	84	79.8	42 916.00

Fuente: Elaboración propia

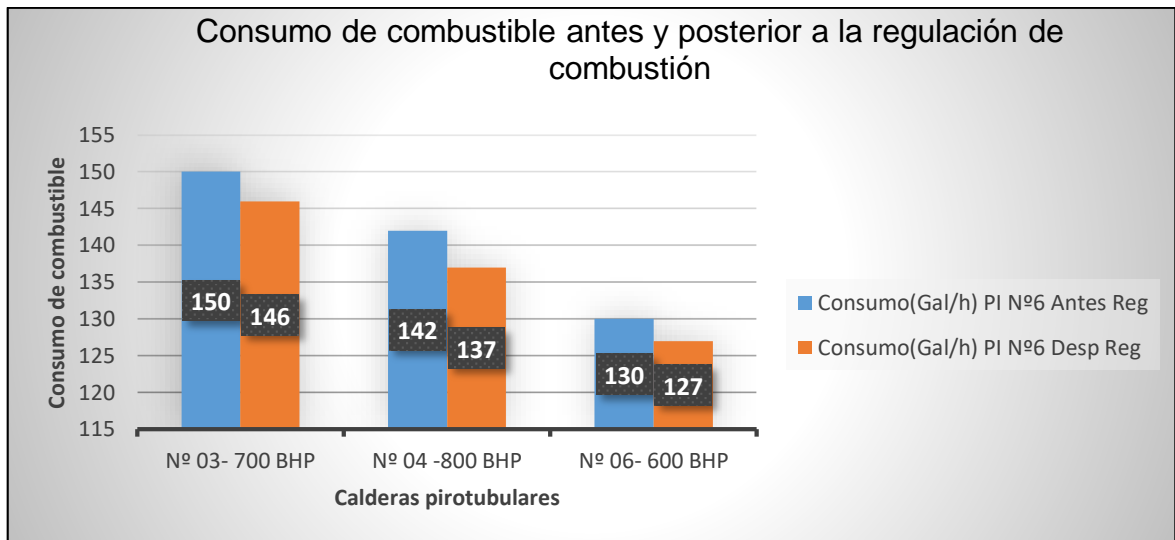


Figura 13. . Relación de consumo de combustible antes y posterior a la regulación de combustión

Fuente: Elaboración propia

**Descripción:** La relación entre el consumo de combustible antes y posterior a la regulación de combustión para las calderas pirotubulares indicadas de la planta, en los ahorros del ajuste de combustión que se obtienen al regular el exceso de aire en relación al flujo o consumo de combustible disminuye entre 3 a 5 galones significando un ahorro importante de combustible aun cuando para la atomización se incrementa muy ligeramente la presión de combustible.

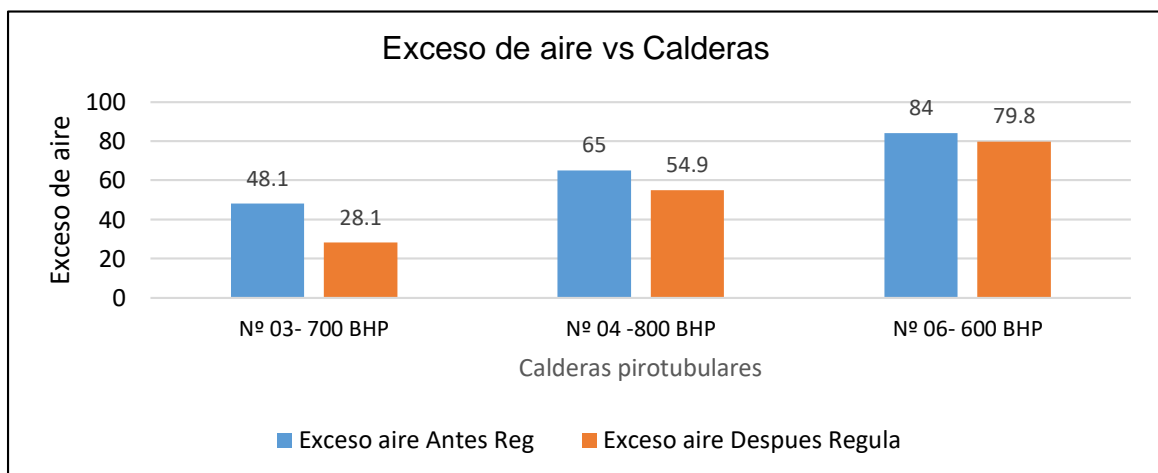


Figura 14. Exceso de aire antes y posterior a regulación de combustión, longitud de llama 75%.

Fuente: Elaboración propia

**Descripción:** En la gráfica se tiene el exceso de aire inicial con la que venía operando las calderas y los excesos de aire posterior a la regulación, las diferencias se basaron en el punto de longitud de llama de combustión al 75%, y las características y composición de gases de combustión. Para las tres calderas pirotubulares se tiene márgenes de reducción de exceso muy considerables específicamente en la calderas N° 03 de 800 BHP se considera el exceso de aire más bajo regulado a 28.1% siendo este valor el porcentaje a la cual la caldera generaba gases de combustión con los parámetros de composición óptimo y en buen margen de rendimiento de combustión , sin embargo en la caldera N° 04 de 700 BHP se regulo desde 65% a 54.9 % siendo el exceso un valor moderado y que en sus condiciones de longitud de llama al 75% y la composición de gases medidos con analizador de gases, determina su régimen óptimo, y para la caldera N° 06 de 600 BHP se tiene un valor de exceso de aire que varía desde 80% a 79.8 por ciento un margen fino o mínimo de regulación pero algo crítico con respecto al valor regulado , es decir que aun el exceso es alto y que se tiene que mantener en esa relación para producir una combustión adecuada, este margen alto de exceso de aire se da por lo descrito anteriormente , que en esta caldera se encontró accesorios que no corresponden a su origen de fábrica y presentaba mayores deficiencias en sus sistema de atomización de combustible.

## V. DISCUSIÓN

Según Quispe y Apaza, determinan que la eficiencia más elevada como respuesta de la operación de la caldera varía entre 65% a 85% operando a nivel del mar considerando el autor como un valor de referencia de eficiencia de calderas pirotubulares, basado también en las condiciones operativas, antigüedad tipo de combustible utilizado y variables de operación, sin embargo comparando los resultados propios, las calderas N° 03 de 700 BHP, caldera N° 04 de 800 BHP y la caldera N° 06 de 600 BHP antes de su regulación de combustión mantenían eficiencias similares a la de los autores referenciados a diferencia de la caldera N° 06 de 600 BHP quien sostenía una operación crítica y una eficiencia debajo del 80%. Asimismo se puede observar la dependencia del estado operativo de las calderas pirotubulares en cuanto a su calidad de combustión para sostener una eficiencia óptima que bordee entre el 80 y 87% siendo estos parámetros valores mínimos y máximos encontrados en las distintas plantas industriales del rubro pesquero a diferencia del valor de 65% que se presenta en la eficiencia de operación de la referencia citada, de la cual se puede concluir que es el equipo de mayor criticidad para el servicio de generación de vapor en planta.

Según Brances A, Mazuera, H (2014), estudiaron los componentes que afectan la eficiencia térmica de una caldera pirotubular de uso para laboratorio estableciendo una correlación entre los resultados de los parámetros de combustión atribuyendo que la baja eficiencia del equipo térmico se atribuye a una baja temperatura de ingreso de agua de alimentación y además una temperatura alta de gases de combustión, sin embargo lo encontrado por Brances y colega se relaciona a los indicadores en la presente investigación ya que las temperaturas de gases antes de la regulación de combustión de las calderas fluctuaron entre 248.3 y 287.8 °C. De los datos mostrados por los autores referenciados el proceso de combustión referido a su calidad o la forma en que se viene quemando el combustible sigue siendo una variable de alta influencia en las operaciones de las calderas pirotubulares pues los autores mencionados encontraron un indicador de baja eficiencia de combustión y un exceso elevado de temperatura esto se asocia a que la relación aire combustible no se encuentra en la relación óptima, partiendo de un análisis de balance estequiométrico ideal, pues la relación mínima de aire combustible debe mantenerse la proporción entre 17 a 18 unidades de aire por una

unidad de combustible, al ser un sistema de calderas que utilizan petróleos residuales para combustión, la relación de presencia de aire en la combustión debe mantener una estricta cantidad para oxidar al combustible y debe ingresar a una temperatura lo suficientemente apta para fluir, es decir entre 110 a 115°C, el ajuste de combustión se recomienda mínimo 2 veces al año según la carga o periodos de trabajo que se demandan en las calderas, sin embargo atender la temperatura de gases es otro indicador infalible para detectar problemas de combustión y por ende baja transferencia de calor en la superficie de calefacción, se estima que la temperatura de los gases es una función de los elementos que combustionan y su régimen fluido dinámico y depende también del poder calorífico del combustible que se opera.

Respecto a la propuesta de Jiménez, F(2017), los resultados concluyen que el equipo funciona con eficiencia del 80% además de haber propuesto la adición de un sistema de control y regulación en el exceso de aire para mantener los niveles controlados de componentes de gases de combustión en la caldera, sin embargo la eficiencia que se obtuvo en este informe se asemeja a los obtenidos antes de la regulación, a lo que posteriormente mejoraron considerando que no se realizó cambios tecnológicos solo mantenimiento y puesta en regulación de parámetros de aire de combustión y revisión de sistema de combustible hacia quemador. De lo propuesto por los autores citados pues un sistema automatizado que regule el exceso de aire según la demanda o carga de vapor instantánea es el método más exacto y óptimo que asegura la confiabilidad del servicio para producir vapor continuamente y cuando se requiere, además de asegurar la seguridad del equipo esto se consolida también en un ahorro de combustible pues según la intermitencia de la demanda el sistema regulara la dosis de combustible en función de cómo se distribuya el vapor en el manifold de distribución hacia los equipos consumidores en planta, sin embargo en el presente trabajo de investigación no se cuenta con un sistema automatizado de regulación de exceso de aire pero la regulación fija realizada asegura por un buen periodo la respuesta efectiva de la combustión haciéndola eficiente, considerando que las fluctuaciones de la demanda del servicio de vapor en planta siguen tres niveles, la descarga desde el manifold para abastecer a las cocinas y secadores y las que proveen vapor para la planta evaporadora que son los bloques de consumos mayores sin embargos otras áreas reciben vapor a menor escala.

Respecto al trabajo de Paredes, G (2016), propuso su investigación relacionando la eficiencia de una caldera pirotubular con énfasis en el consumo de combustible como potencial de ahorro económico y de optimización de indicadores energéticos de productividad, sin embargo, las mejoras que se encontró en este informe mejoran directamente los indicadores operativos de las unidades de generación de vapor en planta. La estrategia de los autores referenciados a regular u optimizar su consumo de combustible para obtener ahorros , esta medida la siguieron debido a que detectaron lo que se denomina oportunidades de ahorro , y se orienta a una campaña de revisión o visita in situ a los equipos en planta con el fin de mejorar el rendimiento de planta basado en optimización de equipos que generan o consumen alguna forma de energía, sin embargo un ahorro de combustible se orienta a revisar el proceso de combustión , pes los autores consideran que haciendo una afinación en sus proceso ahorran combustible .

Los resultados de Celada, J (2017), muestran la eficiencia de la caldera pirotubular N° 01 en 73% y la caldera pirotubular N° 02 en 78%, luego las eficiencias mejoraron hasta 89% y 87% respectivamente , sin embargo los resultados de este informe se asemejan a los valores presentados por los autores citados considerando además que el régimen de uso operativo hospitalario opera en 03 ciclos de servicio mientras que las calderas en la industria pesquera responden a mayores demandas de vapor para los procesos. Como es de conocimiento mejorar la eficiencia desde 73% y 78% hasta 89% y 87% se debe esencialmente a factores de regulación de combustión y mantenimiento de superficie de calefacción (tubos y hogar de caldera), sin embargo el trabajo de los autores citados es exitoso desde la perspectiva de sus indicadores debido a que no requieren quemar más dosis de combustible sino más bien han recuperado eficiencia , esto significa directamente un ahorro real económico, para la presente investigación al contar con calderas de potencias medias a elevadas , tuvimos un caso de criticidad con solo una caldera la cual pudo ser atendida con resultados esperados asegurando su integración a la generación junto a las demás calderas para atender la demanda de vapor en planta.

Respecto a Bocanegra, W. (2017), en la tesis “Influencia de los parámetros de operación en el rendimiento de la caldera pirotubular en una planta de harina, (2017). Aplicando la NTP.350.300.2008 obtuvo resultados indican que la caldera pirotubular incremento su eficiencia desde 82.82% hasta 85.74% lográndose



reducir además el exceso de aire desde 65% hasta 30%, sin embargo, los resultados presentados por los autores coinciden totalmente en la incidencia que tiene la baja eficiencia respecto del alto nivel de aire de combustión. Asimismo conseguir una mejora de eficiencia de casi 3% es un valor muy aceptable cuando se trata de equipos de gran capacidad evaporativa , pues el autor citado considera también el efecto de haber reducido su relación de aire a fin de que la combustión se presente en óptimas condiciones , esta práctica se nota frecuentemente en el servicio diario de calderas en plantas debido a que se busca que la eficiencia de combustión sea el óptimo y se sobre exceder el exceso recomendado de aire, se sabe por mecánica de fluidos que al incrementar el flujo de aire , se adquiere más energía cinética de gases que recorren el interior de los tubos, este exceso de velocidad hace que los gases salga muy rápido por los pasos y tenga menos tiempo de contacto con el área o superficie de transferencia de calor , situación que da como resultado gases a la salida de chimenea más calientes de lo debido, ocasionando una pérdida de eficiencia. Ahora con el uso de analizadores de gases aplicados bajo el método indirecto de la NTP.350.300.2008, se puede detectar estas pérdidas.

Sin embargo los resultados que han obtenido los autores citados van desde la regulación hasta el control automatizado de sus quemadores esta característica deja un importante punto de análisis y discusión de carácter técnico debido a que ahora las calderas totalmente automatizadas programan su ciclo operativo haciéndolas adaptables al régimen de carga sin embargo surge el caso que de este sistema integral automatizado surge la dependencia total es decir si se detecta una falla , el sistema de seguridad interrumpe la operación de la caldera por seguridad haciéndola dependiente d los eventos desde simples hasta los más críticos , es una situación que operadores e ingenieros de planta evalúan al automatizar su sistema de generación de vapor sin embargo cada prestación o servicio en planta exige una cualidad y característica especial pues algunas plantas deciden automatizar algunas calderas mientras que otras optan por mantener el mecanismo semiautomático, considerando el avance tecnológico a seguir los quemadores on/off y quemadores modulante se ajustan a cada prestación siendo estos últimos lo de alta preferencia en ciclos de servicio variado o muy intermitente donde se consiguen beneficios económicos muy importantes.

## VI. CONCLUSIONES

- La eficiencia térmica sin regulación determinada mediante la NTP.350.300.2008 bajo el Método indirecto corresponde a 80.93% para la caldera pirotubular N° 03 de 700 BHP, en la caldera N° 04 de 800 BHP corresponde una eficiencia de 81.64% y en la caldera pirotubular N° 06 de 600 BHP corresponde a 76.37 % respectivamente.
- Se reguló los parámetros de combustión evaluando el desarrollo de longitud de llama desde llama mínima, llama al 25%, al 50%, 75% y 100% respectivamente obteniéndose medidas de registro de gases de los principales componentes de gases de combustión obteniéndose que el régimen óptimo de longitud a la que deben operar las calderas es de 75%, donde se indicándose que no es adecuado desarrollar la llama al 100% para evitar daños en el refractario del caldero por altas temperaturas.
- Se obtuvo los parámetros de combustión de las longitudes de llama se resumen en los 06 calores perdidos según el método indirecto de la NTP.350.300.2008 en régimen antes de la regulación cuyos valores para cada calderas son respectivamente :Caldera N° 03 700 BHP ( $P_1=10.84\%$   $P_2=6.0\%$   $P_3=0.0450\%$   $P_4=1.57\%$   $P_5=0.291\%$   $P_6=0.335\%$ ), para la caldera N° 04 de 80 BHP , corresponde a ( $P_1=10.08$  ,  $P_2=6.13\%$   $P_3=0.034\%$  ,  $P_4=1.57\%$  ,  $P_5=0.202\%$   $P_6=0.339\%$ ) y para la caldera N° 06 de 600 BHP se tiene ( $P_1=15.03\%$  ,  $P_2=6.34\%$  ,  $P_3=0.063\%$  ,  $P_4=1.57\%$  ,  $P_5=0.259\%$  ,  $P_6=0.295\%$ ).
- La eficiencia posterior a la regulación de combustión presentó mejoras obteniéndose para la caldera N° 03 de 700 BHP, un valor de 83.26%, para la caldera N° 04 de 800 BHP un valor de 83.08% y para la caldera N° 06 de 600 BHP un valor de 81.37%. En cuanto a las emisiones de monóxido de carbono CO, se encontró que la caldera más crítica es la caldera N° 06 de 600 BHP, con un valor equivalente de 137.5 mg/Nm<sup>3</sup>, y que comparado con el límite máximo permisible de la NTP. 350.301.2008, equivale al 39.2% del máximo que equivale a 350 mg/Nm<sup>3</sup>. Las emisiones de monóxido de carbono CO, la caldera más crítica fue la N°06 de 600 BHP registrando un valor de 137.5 mg/Nm<sup>3</sup> a

longitud de 75% de llama y  $162.5 \text{ mg/Nm}^3$  al 100% de longitud de llama, correspondiendo al 39.28% y 46.42% respectivamente del valor límite máximo permisible que equivale a  $350 \text{ mg/Nm}^3$  según la NTP.300.301.2009 estándares de eficiencia térmica(combustible/vapor) y etiquetado, el ahorro de combustible. Posterior a la regulación indica que en la caldera de 700 BHP se obtiene un ahorro de 4 gal/h, para la caldera de 800 BHP, se tiene 5 gal/h y la caldera de 600 BHP se tiene 3 gal/h alcanzando ahorros económicos anuales de 72 750 soles, 65 025 soles y 42 916 soles respectivamente.

## VII. RECOMENDACIONES

- Es importante sustituir el filtro de combustible de la línea de alimentación de petróleo hacia la Caldera N° 03 de 700 BHP ya que presenta deterioro.
- Es recomendable para iniciar cualquier estudio relacionado a la operación de equipos térmicos como calderas, contar con línea base de información estadística a fin de establecer un diagnóstico de la situación actual de las calderas, ente estudio se eligió a 03 calderas de 07 calderas que sostiene la productividad en la planta pesquera, en base a resultados de eficiencia de combustión.
- Para obtener mejoras en la eficiencia de combustión se recomienda realiza los cambios de filtros periódicamente a fin de evitar caídas de presión significativas que puedan afectar la atomización del combustible considerando que el petróleo residual 6 presenta una ligera viscosidad.
- Desmontar los quemadores de las 03 calderas a fin de hacer una inspección visual y algunas mejoras correctivas respecto a adherencia de material combustible que se combustiona sobre su tobera para evita obstrucciones.
- Mantener el exceso de aire adecuado en el sistema de combustión de las calderas a fin de evitar pérdidas de calor por los gases emitidos por las chimeneas, se recomienda en lo posible cambiar la tecnología del quemado de la caldera N° 06 de 600 BHP a un sistema de quemador modulante ya que es la unidad que más baja eficiencia presento.
- Precalentar el agua de alimentación con vahos o retornos de condensados ya que actualmente el tanque de abastecimiento de agua caliente para las calderas se mantiene a 71°C pudiendo mejorarse hasta 90°C.
- Mantener el nivel de llama de combustión en un 75% para evitar que este tope los refractarios de la caldera.
- Mantener las condiciones de ajuste de combustión regulados para evitar emisiones de carbono al medioambiente.

## REFERENCIAS

- Andrade, T., & Fernando, O. (2021). Evaluation of the 150 bhp fire tube boiler at Industria Lechera Floralp SA.
- Aguilar Tucubal, M. A. (2015). Study of the energy and combustion efficiency of a boiler used in a food manufacturing plant and a proposal to increase operating efficiency (Doctoral dissertation, Universidad de San Carlos de Guatemala).
- Aguirre, E. J. L. (2011). Energy efficiency solutions in combustion installations. *The Installer*, (487), 5-10
- Baltodano Salgado, F. D. L. Á., Sevilla Cruz, H. U., & Aguirre Vásquez, L. J. (2021). Evaluation of the steam generation system of the Hospital Escuela San Juan De Dios Estelí, for the presentation of proposals for alternatives to improve the system, during the period II semester 2020 (Doctoral dissertation, National Autonomous University of Nicaragua, Managua).
- Barrera Puigdollers, M. C., Castelló Gómez, M. L., Betoret Valls, N., & Pérez Esteve, E. (2018). Basic principles of combustion. Bahamondes, P. A. (2006). *Boiler Power and Performance*. Santiago de Chile.
- Baldoceda López, A. F. (2002). Feasibility study to determine the type of fuel to use in a 500 BHP boiler.
- Bermúdez Vásquez, E. A. (2005). Energy efficiency of the 250 BHP firetube boiler colmáquinas of a pharmaceutical laboratory (Bachelor's thesis, Universidad Autónoma de Occidente).
- BETTELHIEM, J., & BILLINGE, B. (2021). flue gases from power plants and industrial boilers. *Air Pollution by Industry*, 295.

- Cansaya Quispe, N. A., & Huallata Apaza, P. (2015). Diseño de calderas pirotubulares de 15 BHP con parámetros de trabajo para altitudes superiores a 3800 MSN.
- Carrión Salazar, C. J., & Maquera Cusacani, E. W. (2018). Diagnóstico experimental para la detección de fallas en una caldera pirotubular de 150 BHP para proponer plan de mantenimiento predictivo en la ciudad de Arequipa. Capcha Soto, R. S., & Albuja Escudero, M. G. (2011). Análisis de la conversión de un quemador de petróleo industrial N° 6 a Gas Natural para reducir costos de la reconversión de caldera en VOPAK SERLIPSA.
- Çengel, Y. A., Boles, M. A., & Buesa, I. A. (2006). *termodinámica* (Vol. 10). São Paulo: McGraw-Hill. ión y cálculo de una caldera pirotubular para combustión de carbón antracita peruano.
- García Gonzales, Y. J., & Ticona Nina, F. V. (2021). Optimización de la eficiencia térmica por regulación del grado de apertura de chimenea, para la caldera pirotubular de 12 BHP, del laboratorio de máquinas térmicas de la Carrera Profesional de Ingeniería Mecánica Eléctrica del campus San Antonio-UJCM 2018.
- Guayacundo Martínez, D. M., & Suárez Holguín, R. E. (2014). Diseño del sistema de instrumentación y control del tratamiento de gases de combustión de una caldera de vapor.
- Golato, M. A., Franck Colombres, F. J., Aso, G., Correa, C. A., & Paz, D. (2008). Methodology for calculating the thermal efficiency of steam generators. *Industrial and Agricultural Magazine of Tucumán*, 85 (2), 17-31.
- Gómez Saldarriaga, J. L., Vélez Jaramillo, D. A., & Zuluaga Rendón, E. A. (2006). Informe de auditoría energética realizada a caldera de 300 bhp en la empresa química amtex SA planta 2 (Doctoral dissertation, Universidad Cooperativa de Colombia, Facultad de Ingenierías, Ingeniería Mecánica, Medellín y Envigado).

- Gobernado Arribas, I. (2012). Combustión de mezclas de gasóleo y aceites vegetales para su uso como combustible en calderas de baja potencia.
- Inga, H., & Newton, C. Análisis de un caldero pirotubular de 300 BHP, usando combustibles diésel y GLP, para mejorar la eficiencia, en la Empresa Agromantaro SAC.
- Jave Diaz, M. A. (2009). Supervisión y control de generación de vapor en calderas pirotubulares.
- Kreith, F., Bohn, M. S., & Salas, R. N. (2001). Principles of heat transfer. Thomson Learning.
- López Torres Sánchez, R. A. (2017). Economic Technical Evaluation to Reduce the Energy Consumption Index in the “Las Mercedes” Regional Teaching Hospital, Chiclayo, Lambayeque 2016.
- Matta, B., & Ebert, W. (2018). Influencia de los parámetros de operación en el rendimiento de la caldera pirotubular en una planta de harina, 2017.
- Marreros, M., & Marcelo, O. (1997). Instalación y mantenimiento de calderas pirotubulares que utilizan combustible residual.
- Mamani Montesinos, C. M., & Ramos Vélez, F. W. (2018). Optimización energética del generador de vapor (caldera) del comedor universitario de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno con capacidad de 150 kg de vapor/hora Marcos, A., Gañán, J., González, J. F., Turégano, J., Miranda, A., & Correira, S. OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE COMBUSTIÓN EN UNA CALDERA DE CALEFACCIÓN DE 465 KW, MODELO CPA DE ROCA.
- Meléndez Gómez, S. A. (2006). Conversión a gas natural seco de una caldera Pirotubular con potencia de 500 BHP que trabaja con diesel-2.

- Morán, MJ, Shapiro, HN, Boettner, DD y Bailey, MB (2010). Fundamentos de la ingeniería termodinámica. John Wiley.
- Mott, R. L. (2006). Fluid Mechanics 6 / e. Pearson education.
- Muñoz Vélez, W., & Piza Gallego, G. (1995). Curso de calderas pirotubulares: controles y mantenimiento.
- NTP, N. T. P. 350.300 2008. Procedimiento para la determinación de la Eficiencia Térmica de Calderas Industriales. (2a ed.). Lima Perú. Otazú Ramos, A. R., & Ancco Mendoza, W. E. (2019). Diagnóstico y mejoramiento del tiempo y presión de operación mediante la producción continua de vapor para la caldera del laboratorio de máquinas térmicas de la Carrera Profesional de Ingeniería Mecánica Eléctrica del Campus San Antonio–UJCM 2018.
- Pacheco, R. C., & Toledo, R. V. (2007). Evaluación termo económica de un generador de vapor pirotubular. Avanzada Científica, 10(3), 3.
- Pacheco Monzón, R. A., & Vargas Santiago, D. G. (2021). Recuperación de gases de caldera 500 BHP para calentamiento de agua en una máquina removedora de piel de pescado-Empresa Conservera la Chimbotana SAC.
- Paredes Fajardo, G. A. (2016). Evaluación de los parámetros operacionales de la caldera pirotubular YB 701C 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 (Master's thesis, Ecuador: Latacunga: Universidad Técnica de Cotopaxi: Dirección de Posgrados.).
- Pezoa, I. Alternativas De Control De Combustión En Calderas Industriales.
- Pineda, R. F. G. (2017). Metodología para determinar la eficiencia energética de calderas de baja potencia.



- Peña Revenga, G. D. L. (2017). Optimización del proceso de combustión de aceites vegetales en una caldera semi-industrial.
- Risco Álvarez, R. (2019). Análisis Energético A La Caldera Piro-tubular A Carbón Para Reducir Costos De Producción De Vapor E Impactos Medioambientales En La Empresa Piel Trujillo SAC.
- Rojas Gálvez, B. A., & Mazuera Dorado, H. A. (2014). Análisis, diagnóstico y propuesta de mejora de los principales componentes operacionales que afectan la eficiencia de la caldera Piro-tubular del laboratorio de vapor de la universidad Autónoma de Occidente (Bachelor's thesis, Universidad Autónoma de Occidente).
- Rubio Ramírez, C., Martheyn Lizarazo, G., Bermúdez Santaella, J., & Vera Duarte, E. (2016). Determinación de la emisividad de llama y el calor de radiación por combustión en el hogar de una caldera.
- Valverde Agreda, J. L. (2017). Plan de gestión energética en el sistema de vapor saturado en curtiembre cuenca, basado en auditoria térmica y normas peruanas, para aumentar eficiencia y reducir costos de generación de vapor.
- Vacacela Miranda, W. M. (2011). Estudio de parámetros de combustión en un calderín de 2 bhp y su efecto sobre la eficiencia (Bachelor's thesis, Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica. Carrera de Ingeniería Mecánica).
- Vásquez, B., & Alfonso, L. (2014). Diseño de un sistema de purga automática de fondo y superficie para ahorro y disponibilidad de energía térmica en una caldera piro-tubular de 1000 BHP.

## ANEXOS

### Anexo 1. Matriz de Operacionalización de Variables

Variable	Definición Conceptual	Definición operacional	Indicador	Escala de medición	Instrumento de medición
Variable independiente: Regulación de parámetros de combustión	La regulación de parámetros de combustión son un conjunto de procedimientos que se realiza para mantener una combustión completa.	La regulación de combustión consistirá en la relación de proporción de aire y combustible de alimentación	Relación de aire – combustible	Kg aire/kg comb	Flujómetro
			Exceso de aire en gases de combustión	Porcentaje	Analizador de gases
			Flujo másico de aire	Kg/s	Metodológico
Variable dependiente: Eficiencia térmica	Es una unidad de medida comparativa que relaciona la forma o medida en que se utiliza la energía útil sobre la energía suministrada al sistema.	La eficiencia térmica es un indicador que se cuantifica mediante la ejecución de Normas técnicas para su valoración e interpretación.	Pérdidas de calor	Porcentaje	Metodología (NTP)
			Composición de gases de combustión	Ppm, porcentaje	Analizador de gases
			Temperatura de gases de combustión	Grados centígrados	Termocupla

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 2. Tabla de Instrumento de recolección de datos según regulación de llama

Combustión		Pérdidas	Valor (%)	Eficiencia
Caldera 1	Fuego mínimo			
	Fuego 25%			
	Fuego 50%			
	Fuego 75%			
Fuego 100%				

Fuente. Elaboración propia.

Anexo 3: Tabla de cualificación de tipo de llama de combustión

Caracterización de color de llama de combustión a diferentes longitudes de llama					
LLAMA DE COMBUSTIÓN	TAMAÑO DE LLAMA	COLOR DE LLAMA	CALDERA 01	CALDERA 02	CALDERA 03
	Fuego mínimo	Rojizo			
		Anaranjado			
		Amarillo			
	Fuego al 25%	Rojizo			
		Anaranjado			
		Amarillo			
	Fuego al 50%	Rojizo			
		Anaranjado			
		Amarillo			
Fuego al 75%	Rojizo				
	Anaranjado				
	Amarillo				
Fuego al 100%	Rojizo				
	Anaranjado				
	Amarillo				

Fuente: Elaboración propia

#### Anexos 4. Fotografías de 03 Calderas pirotubulares



Fuente: Área de mantenimiento de planta pesquera.

#### Anexos 5. Fotografías de Calderas pirotubulares (vista lateral)



Fuente: Área de mantenimiento de planta pesquera.

Anexo 6. Reporte de datos de analizador de gases de regulaciones de combustión

**Caldera N° 03: 800 BHP**

Régimen Fuego mínimo

-----	
V1. 10	testo 320 03062254/USA
-----	
Protocol	12/12/2020 14:13:56
-----	
Location	CALD #2
Combustion Type	2nd combustion type
CFG CHIM SUR	
-----	
Fuel:	Fueloil # 6
O2ref.	3.0 %
CO2 Max:	16.7 %
-----	
Combustion test	
121.3 °C	Temp. stack
3.7 %	Oxygen
80 ppm	CO
13.75 %	CO2
91.8 %	Eff. net
20.3 %	Excess air
33.7 °C	Ambient temp

Régimen Fuego 25%

-----	
V1. 10	testo 320 03062254/USA
-----	
Protocol	12/12/2020 14:16:55
-----	
Location	CALD #2
Combustion Type	2nd combustion type
CFG CHIM SUR	
-----	
Fuel:	Fueloil # 6
O2ref.	3.0 %
CO2 Max:	16.7 %
-----	
Combustion test	
136.6 °C	Temp. stack
4.3 %	Oxygen
63 ppm	CO
13.27 %	CO2
91.0 %	Eff. net
24.4 %	Excess air
33.8 °C	Ambient temp

Régimen de fuego

-----	
V1. 10	testo 320 03062254/USA
-----	
Protocol	12/12/2020 14:19:02
-----	
Location	CALD #2
Combustion Type	2nd combustion type
CFG CHIM SUR	
-----	
Fuel:	Fueloil # 6
O2ref.	3.0 %
CO2 Max:	16.7 %
-----	
Combustion test	
181.2 °C	Temp. stack
4.2 %	Oxygen
80 ppm	CO
13.35 %	CO2
89.3 %	Eff. net
23.7 %	Excess air
33.8 °C	Ambient temp

Régimen de fuego

-----	
V1. 10	testo 320 03062254/USA
-----	
Protocol	12/12/2020 14:21:43
-----	
Location	CALD #2
Combustion Type	2nd combustion type
CFG CHIM SUR	
-----	
Fuel:	Fueloil # 6
O2ref.	3.0 %
CO2 Max:	16.7 %
-----	
Combustion test	
202.1 °C	Temp. stack
4.8 %	Oxygen
76 ppm	CO
12.87 %	CO2
88.2 %	Eff. net
28.1 %	Excess air
33.7 °C	Ambient temp

## Régimen de fuego

-----	
<b>testo 320</b>	
<b>V1. 10</b>	<b>03062254/USA</b>
-----	
<b>Protocol</b>	
<b>12/12/2020</b>	<b>14:23:16</b>
-----	
<b>Location</b>	
<b>CALD #2</b>	
<b>Combustion Type</b>	
<b>2nd combustion type</b>	
<b>CFG CHIM SUR</b>	
-----	
<b>Fuel:</b>	<b>Fueloil # 6</b>
<b>O2ref.</b>	<b>3.0 %</b>
<b>CO2 Max:</b>	<b>16.7 %</b>
-----	
<b>Combustion test</b>	
<b>204.9 °C</b>	<b>Temp. stack</b>
<b>4.6 %</b>	<b>Oxygen</b>
<b>81 ppm</b>	<b>CO</b>
<b>13.03 %</b>	<b>CO2</b>
<b>88.2 %</b>	<b>Eff. net</b>
<b>26.6 %</b>	<b>Excess air</b>
<b>33.6 °C</b>	<b>Ambient temp</b>
-----	

# Caldera Nº 04: 700 BHP

## Régimen Fuego mínimo

testo 320	
V1. 10	03062254/USA
Protocol	
12/12/2020	12:54:13
Location	
CALD #4	
Combustion Type	
2nd combustion type	
CFG CHIM SUR	
Fuel:	Fueloil # 6
O2ref.	3.0 %
CO2 Max:	16.7 %
Combustion test	
166.4 °C	Temp. stack
3.8 %	Oxygen
78 ppm	CO
13.67 %	CO2
90.0 %	Eff. net
20.9 %	Excess air
33.5 °C	Ambient temp

## Régimen Fuego 25%

testo 320	
V1. 10	03062254/USA
Protocol	
12/12/2020	12:55:53
Location	
CALD #4	
Combustion Type	
2nd combustion type	
CFG CHIM SUR	
Fuel:	Fueloil # 6
O2ref.	3.0 %
CO2 Max:	16.7 %
Combustion test	
212.0 °C	Temp. stack
4.7 %	Oxygen
57 ppm	CO
12.95 %	CO2
87.9 %	Eff. net
27.3 %	Excess air
34.6 °C	Ambient temp

## Régimen Fuego 50%

testo 320	
V1. 10	03062254/USA
Protocol	
12/12/2020	12:57:27
Location	
CALD #4	
Combustion Type	
2nd combustion type	
CFG CHIM SUR	
Fuel:	Fueloil # 6
O2ref.	3.0 %
CO2 Max:	16.7 %
Combustion test	
236.6 °C	Temp. stack
8.3 %	Oxygen
57 ppm	CO
10.08 %	CO2
84.8 %	Eff. net
61.9 %	Excess air
37.4 °C	Ambient temp

## Régimen Fuego 75%

testo 320	
V1. 10	03062254/USA
Protocol	
12/12/2020	12:59:19
Location	
CALD #4	
Combustion Type	
2nd combustion type	
CFG CHIM SUR	
Fuel:	Fueloil # 6
O2ref.	3.0 %
CO2 Max:	16.7 %
Combustion test	
235.4 °C	Temp. stack
7.7 %	Oxygen
58 ppm	CO
10.56 %	CO2
85.2 %	Eff. net
54.9 %	Excess air
36.5 °C	Ambient temp



Régimen Fuego 100 %

testo 320	
V1.10	03062254/USA
-----	
Protocol	
12/12/2020	13:02:58
-----	
Location	
CALD #4	
Combustion Type	
2nd combustion type	
CFG CHIM SUR	
-----	
Fuel:	Fueloil # 6
O2ref.	3.0 %
CO2 Max:	16.7 %
-----	
Combustion test	
248.3 °C	Temp. stack
6.7 %	Oxygen
64 ppm	CO
11.36 %	CO2
85.4 %	Eff. net
44.4 %	Excess air
38.4 °C	Ambient temp

# Caldera N° 06: 600 BHP

## Régimen Fuego mínimo

-----	
V1.10	testo 320 03062254/USA
-----	
Protocol	
12/12/2020	15:36:17
-----	
Location	
CALD #6	
Combustion Type	
2nd combustion type	
CFG CHIM SUR	
-----	
Fuel:	Fueloil # 6
O2ref.	3.0 %
CO2 Max:	16.7 %
-----	
Combustion test	
247.1 °C	Temp. stack
7.1 %	Oxygen
53 ppm	CO
11.04 %	CO2
84.8 %	Eff. net
48.4 %	Excess air
30.3 °C	Ambient temp

## Régimen Fuego 25%

-----	
V1.10	testo 320 03062254/USA
-----	
Protocol	
12/12/2020	15:39:01
-----	
Location	
CALD #6	
Combustion Type	
2nd combustion type	
CFG CHIM SUR	
-----	
Fuel:	Fueloil # 6
O2ref.	3.0 %
CO2 Max:	16.7 %
-----	
Combustion test	
279.4 °C	Temp. stack
10.1 %	Oxygen
75 ppm	CO
8.65 %	CO2
80.0 %	Eff. net
87.8 %	Excess air
30.1 °C	Ambient temp

## Régimen Fuego 50%

-----	
V1.10	testo 320 03062254/USA
-----	
Protocol	
12/12/2020	15:41:17
-----	
Location	
CALD #6	
Combustion Type	
2nd combustion type	
CFG CHIM SUR	
-----	
Fuel:	Fueloil # 6
O2ref.	3.0 %
CO2 Max:	16.7 %
-----	
Combustion test	
281.8 °C	Temp. stack
10.1 %	Oxygen
130 ppm	CO
8.65 %	CO2
79.9 %	Eff. net
87.7 %	Excess air
30.4 °C	Ambient temp

## Régimen Fuego 75%

-----	
V1.10	testo 320 03062254/USA
-----	
Protocol	
12/12/2020	15:43:10
-----	
Location	
CALD #6	
Combustion Type	
2nd combustion type	
CFG CHIM SUR	
-----	
Fuel:	Fueloil # 6
O2ref.	3.0 %
CO2 Max:	16.7 %
-----	
Combustion test	
288.7 °C	Temp. stack
9.6 %	Oxygen
110 ppm	CO
9.05 %	CO2
80.2 %	Eff. net
79.8 %	Excess air
31.0 °C	Ambient temp

Régimen Fuego 100%

-----	
V1.10	testo 320 03062254/USA
-----	
Protocol	
12/12/2020	15:45:08
-----	
Location	
CALD #6	
Combustion Type	
	2nd combustion type
CFG CHIM SUR	
-----	
Fuel:	Fueloil # 6
O2ref.	3.0 %
CO2 Max:	16.7 %
-----	
Combustion test	
287.8 °C	Temp. stack
9.6 %	Oxygen
107 ppm	CO
9.05 %	CO2
80.2 %	Eff. net
79.8 %	Excess air
29.9 °C	Ambient temp
-----	

## Anexo 7. Certificado de calibración de Analizador de Gases



LABORATORIO DE CALIBRACIÓN ACREDITADO POR EL  
ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN INACAL - DA  
CON REGISTRO N° LC - 027



Registro N° LC - 027

### Certificado de Calibración

G-0121-20

Cliente:	VAPORTEC S.A.C.	<p>Instruments Lab S.A.C. cuenta con un laboratorio de calibración que trabaja bajo el sistema de gestión NTP ISO/IEC 17025. Los patrones usados en las calibraciones son calibrados regularmente y son trazables a estándares nacionales e internacionales. Los documentos que se han generado como resultado del presente certificado de calibración, son estrictamente confidenciales y por ninguna causa serán exhibidos ni divulgados por el personal de Instruments Lab S.A.C., obligándose a guardar la confidencialidad de la información que se genere o desarrolle. El servicio de calibración es trazable al Sistema Internacional de Unidades de medida (SI).</p>
Dirección de Cliente:	Av. Dos De Mayo Nro. 744 Dpto. 101 Lima - Lima - Miraflores	
Instrumento:	Analizador de gases	
Fabricante:	Testo SE & Co. KGaA	
Modelo:	Testo 320	
N° de serie:	02430623	
Código Cliente:	No indica	
Alcance de medición:	Ver especificaciones del instrumento (*)	
Resolución:	Ver especificaciones del instrumento (*)	
Exactitud:	Ver especificaciones del instrumento (*)	
N° de Orden de trabajo:	OT-20-0483	
Fecha de Calibración:	2020-10-21	
Lugar de Calibración:	Instruments Lab S.A.C.	

(\*) Las especificaciones del instrumento se encuentran detalladas en las hojas de resultados por cada parámetro.

Este certificado de calibración no puede ser reproducido total ni parcialmente, excepto con la autorización del Laboratorio. Los certificados de calibración sin firma no son válidos.

Emisión Certificado

2020-10-21

Supervisor

Daniel Pizarro

**Procedimiento de Calibración**

IL-PCG-001: "Procedimiento de calibración de analizadores de gases".

**Método de Calibración**

Comparación directa con un Material de Referencia Certificado.

**Incertidumbre de la medición**

La incertidumbre expandida de la medición, fue calculada de acuerdo a las regulaciones de la GUM, con un factor de cobertura  $k=2$ , la cual contiene los procedimientos de incertidumbre de la medición y la incertidumbre del sistema de medición.

**Condiciones Ambientales**

**Temperatura**

22,9 °C

**Humedad**

63,0 %HR

**Certificado de Calibración****G-0121-20****Patrón de referencia**

Material de referencia	Concentración %	Incertidumbre del MRC (k=2) %	N° Cilindro	Fecha de exp. Cilindro
Oxígeno	21,09	0,04	CC732071	2027-11-26

**Especificaciones del instrumento**

Parámetro	Alcance de medición %	Resolución %	Exactitud %
Oxígeno	0 a 21	0,1	0,2

**Resultados**

Parámetro	Valor de referencia %	Valor del instrumento (*) %	Corrección %	Incertidumbre de la medición (k=2) %
O <sub>2</sub>	21,09	21,0	0,09	0,11

(\*) Promedio de 3 mediciones

Hasta aquí los resultados del parámetro de Oxígeno

**Patrón de referencia**

Material de referencia	Concentración ppm	Incertidumbre del MRC (k=2) ppm	N° Cilindro	Fecha de exp. Cilindro
Monóxido de Carbono	1015	4,06	CC732071	2027-11-26

**Especificaciones del instrumento**

Parámetro	Alcance de medición ppm	Resolución ppm	Exactitud ppm
Monóxido de Carbono	0 a 8000	1	50

**Resultados**

Parámetro	Valor de referencia ppm	Valor del instrumento (*) ppm	Corrección ppm	Incertidumbre de la medición (k=2) ppm
CO	1015,0	1012	3,0	12,5

(\*) Promedio de 3 mediciones

Hasta aquí los resultados del parámetro de Monóxido de Carbono

**NOTAS**

1. El instrumento fue calibrado cumpliendo los requisitos de la NTP ISO/IEC 17025, bajo un Sistema de Gestión y competencia técnica. El procedimiento de calibración ha sido diseñado en base a las publicaciones técnicas realizadas por el CEM de España vigente en el tiempo en que se realizó la calibración.
2. El presente certificado ampara únicamente al instrumento sometido a calibración. Los resultados presentados son válidos para el instrumento en su estado y bajo las condiciones que prevalecieron en la calibración.
3. Para dar cumplimiento a la NTP ISO/IEC 17025 en la etiqueta del equipo no se coloca la fecha de vencimiento de la calibración.
4. Las recomendaciones, opiniones y/o declaraciones de cumplimiento o incumplimiento a una conformidad son declaradas por el laboratorio previa solicitud por parte del cliente, mediante la consideración de los resultados obtenidos en la medición.
5. Como parte del servicio de atención a los clientes, favor de enviarnos sus comentarios del servicio de calibración, dudas o aclaraciones del certificado al siguiente correo: [info@instrumentslab.com.pe](mailto:info@instrumentslab.com.pe).

Fin del documento



**7. DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA**

Por tratarse del **Método Indirecto**, o de pérdidas, según indica en el apartado 6.2, la eficiencia se determinará mediante la siguiente expresión:

$$\eta = 100 - (P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6) \dots\dots\dots(7.1)$$

**7.1 Pérdida por la entalpía de los gases de escape secos,  $P_1$**

La pérdida porcentual de calor debida a la entalpía en los gases de escape, en base seca, se calcula mediante:

$$P_1 = k \cdot \frac{T_g - T_a}{[CO_2]} \dots\dots\dots(7.2)$$

Algunos valores típicos de “ $k$ ” se muestran en la Tabla 3.

**TABLA 3 - Valores típicos de la constante de Siegert,  $k$**

Combustible	$k$
Residuales	0,53
Destilados	0,48
GLP	0,40
Gas natural	0,35

El valor “ $k$ ” es la constante de Siegert; puede ser calculado para cualquier combustible, mediante:

$$k = \frac{255 \cdot [C]}{PCS} \dots\dots\dots(7.2a)$$

La relación entre los contenidos de dióxido de carbono y oxígeno es:

$$[CO_2] = \left(1 - \frac{[O_2]}{21}\right) \cdot [CO_2]_{MAX} \dots\dots\dots(7.2b)$$

Los valores típicos de  $[CO_2]_{MAX}$  se muestran en la Tabla 4.

**TABLA 4 - Valores típicos de  $[CO_2]_{MAX}$**

Combustible	$[CO_2]_{MAX}$
Residuales	15,8
Destilados	15,5
GLP	13,8
Gas natural	11,9

**7.2 Pérdida por la entalpía del vapor de agua en los gases,  $P_2$**

La pérdida porcentual de calor debida a la entalpía del vapor de agua en los gases de escape, se calcula mediante:

$$P_2 = \frac{([H_2O] + 9 \cdot [H]) \cdot (2488 - 4,2 \cdot T_e + 21 \cdot T_a)}{PCS} \dots\dots\dots(7.3)$$

*Handwritten notes: 0,19, 11,5, 210, 16, 16,9, 1,12, 342,5, 11,25, 342,5*

**7.3 Pérdida por inquemados gaseosos,  $P_3$**

La pérdida porcentual de calor debida a los inquemados gaseosos, se calcula mediante:

$$P_3 = k_1 \frac{[CO]}{[CO_2] + [CO]} \dots\dots\dots(7.4)$$

Los valores de la constante " $k_1$ ", se muestran en la Tabla 5.

**TABLA 5 - Valores de la constante  $k_f$**

Combustible	$k_f$
Residuales	54
Destilados	53
GLP	48
Gas natural	40

**7.4 Pérdida por inquemados sólidos,  $P_4$**

La pérdida porcentual de calor debida a los inquemados sólidos, se calcula mediante:

$$P_4 = 0,14 \cdot B^2 + 0,08 \cdot B + 0,07 \dots\dots\dots (7.5)$$

**7.5 Pérdida por convección,  $P_5$**

La pérdida porcentual de calor debida a la convección, se obtiene sumando las pérdidas porcentuales por convección para cada tipo de superficie exterior, mediante:

$$P_5 = 80 \cdot \frac{\dot{Q}_{p5}}{\dot{W}_c} \dots\dots\dots (7.6)$$

donde:

$$\dot{Q}_{p5} = h_{cf} \cdot A_f \cdot (T_f - T_a) + h_{cx} \cdot A_x \cdot (T_{cx} - T_a) \dots\dots\dots (7.6a)$$

$$h_{cf} = 1,973 \times 10^{-3} \cdot (T_f - T_a)^{0,25} \cdot (2,857 \cdot v + 1)^{0,5} \dots (7.6b)$$

$$h_{cx} = 1,973 \times 10^{-3} \cdot (T_{cx} - T_a)^{0,25} \cdot (2,857 \cdot v + 1)^{0,5} \dots (7.6c)$$

$$\dot{W}_c = 9,81 \cdot BHP \dots\dots\dots (7.6d)$$

## Anexo 9. Datos de combustible Petróleo Residual 6

### FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD

(Conforme al D.S. 026-94-EM)

#### Petróleo Industrial 6

1. IDENTIFICACIÓN DEL PRODUCTO		
<b>Empresa:</b> REFINERÍA LA PAMPILLA S.A.  <b>Dirección:</b> Casilla Postal 10245 Km. 25 Carretera a Ventanilla, Lima-1  <b>Tel# (51-1) 517-2021</b> <b>(51-1) 517-2022</b>  <b>Fax# (51-1) 517-2026</b>	<b>Nombre comercial:</b> Petróleo Industrial 6 <b>Nombre químico:</b> Residual de petróleo <b>Sinónimos:</b> Petróleo residual, Bunker.  <b>Fórmula:</b> Mezcla compleja de hidrocarburos del petróleo.	<b>N° CAS:</b> 68476-33-5   <b>N° Anexo I (Dir. 67/548/CEE):</b>
	<b>N° CE (EINECS):</b>	

2. COMPOSICIÓN			
<b>Composición general:</b> Combinación compleja de hidrocarburos con número de carbonos en su mayor parte dentro del intervalo C <sub>12</sub> - C <sub>50</sub> . Se obtiene como una mezcla de corrientes a partir de destilación directa. Producto líquido de diversas corrientes de refinería, normalmente residuos. La composición es compleja y varía con el origen del petróleo crudo.			
Componentes peligrosos	Rango %	Clasificación	
		R	S
Hidrocarburos residuales del petróleo.	> 99	Carc. Cat. 2; R45 R66 R52/53	S45-53-61

3. IDENTIFICACIÓN DE PELIGROS	
FÍSICO/QUÍMICOS	TOXICOLÓGICOS (SÍNTOMAS)
Líquido y vapor combustible e inflamable.  Los vapores de fuelóleo son más pesados que el aire y pueden desplazarse hacia fuentes remotas de ignición e inflamarse.	<b>Inhalación:</b> La presión de vapor del producto a temperaturas normales de manejo es baja para permitir una concentración significativa de vapores. Exposiciones repetidas y prolongadas a elevadas concentraciones pueden producir dolor de cabeza, mareos, visión borrosa, fatiga, temblores y convulsiones, así como alteraciones en el sistema nervioso central. A elevadas temperaturas se pueden formar vapores de sulfuro de hidrógeno. Estos vapores son tóxicos, causando efectos que incluyen irritación de las vías altas respiratorias.  <b>Ingestión/Aspiración:</b> No es frecuente, pero, si ocurre, puede causar desequilibrios gastrointestinales. La aspiración del líquido a los pulmones puede producir daño pulmonar.  <b>Contacto piel/ojos:</b> Contactos prolongados o repetidos pueden causar irritación y dermatitis. Puede producir irritación y conjuntivitis.  <b>Efectos tóxicos generales:</b> El producto puede causar irritación de las vías respiratorias superiores, piel y ojos, y en casos extremos puede causar cáncer. El contacto con el producto caliente puede causar quemaduras. Nocivo para los organismos acuáticos, puede provocar a largo plazo efectos negativos en el medio ambiente acuático.

Anexo 10. Valores de Límites Máximos Permisibles NTP 350.301.2009 Estándar de eficiencia térmica (combustible/vapor) y etiquetado.

**C.1 Límites Máximos Permisibles para calderas de vapor de uso industrial<sup>(4)</sup>**

Parámetro	Límite de Emisión (mg/Nm <sup>3</sup> ) <sup>(1)</sup>		
	Combustible		
	Gas	Líquido	Sólido
Partículas sólidas <sup>(2)</sup>	----- --	150	150
SO <sub>2</sub>	300	1500	1500 (carbón)
			100 (bagazo)
			500 (Bag/petro)
NO <sub>x</sub>	320	600	750
CO	100	350	500
Opacidad (Indice Bacharach) <sup>(3)</sup>	0	4	-----

(1) Concentración referida a condiciones normales 0°C, 1 atmósfera, 3% de O<sub>2</sub> para gas y líquidos y 6% de O<sub>2</sub> para sólidos

(2) Para calderas de potencia mayor o igual a 800BHP (líquido) y 300BHP (sólido)

(3) Para calderas menores a 800 BHP

(4) Estos Límites son aplicables a las calderas de vapor pirotubulares y acuotubulares; Asimismo, se aplican a calderas de calentamiento de agua o aceite térmico que queman Diesel, Residual o Gas o en general que queman combustibles fósiles y que pertenecen a las empresas industriales manufactureras pudiendo ser de aplicación por otros sectores.

NOTA: El monitoreo de las emisiones atmosféricas se realizará conforme al Protocolo de Monitoreo de Emisiones Atmosféricas aprobado por Resolución Ministerial N° 026-2000-ITINCI/DM.

Anexo 11: Factores de conversión aplicado a la NTP.350.301.2009 eficiencia térmica (combustible/vapor) y etiquetado.

**B.2 EQUIVALENCIA DE UNIDADES**

<b>GAS</b>	<b>EQUIVALENCIA DE CONCENTRACIÓN SEGÚN GAS</b>
<b>CO</b>	1 ppm equivale a 1,25 mg/Nm <sup>3</sup>
<b>NO</b>	1 ppm equivale a 1,34 mg/Nm <sup>3</sup>
<b>NO<sub>x</sub></b>	1 ppm equivale a 2,05 mg/Nm <sup>3</sup>
<b>SO<sub>2</sub></b>	1 ppm equivale a 2,86 mg/Nm <sup>3</sup>
<b>C<sub>3</sub>H<sub>8</sub></b>	1 ppm equivale a 1,98 mg/Nm <sup>3</sup>

<b>POTENCIA</b>	<b>W (J/s)</b>	<b>HP</b>	<b>BTU/h</b>	<b>Cal/seg</b>	<b>ft.lb/seg</b>
1 W (J/s)	1	0,001341	3,4121	0,239	0,7376
1 HP	745,701	1	2 544,43	178,2	550
1 BTU/h	0,293	0,000393	1	0,07	0,216
1 Cal/seg	4,184	0,00561	51 444	1	0,0003

## Anexo 12. Precios de combustibles, enero 2021



División de Supervisión Regional  
Supervisión de Comercialización de Hidrocarburos Líquidos

### PRECIOS PROMEDIO DE COMBUSTIBLES (Soles/Galón) DISTRIBUIDORES MAYORISTAS - ENERO 2021

Soles/Galón

DEPARTAMENTO	G100 LL	DB5 S-50 UV	G98 BA	G97	G95	G90	G84	Gasohol 84 Plus	Gasohol 90 Plus	Gasohol 95 Plus	Gasohol 97 Plus	Gasohol 98 Plus	DIESEL B5 UV	Turbo A-1 2/	PI 6	PI 500
AMAZONAS		11.26				11.65	11.24						11.17	12.17	9.46	
ANCASH		10.19				10.42	7.23	9.78	10.49				9.07		8.67	8.69
AREQUIPA		10.77				10.42	10.11	10.51	10.65					2.61	9.07	8.86
CUSCO		10.98				9.55	9.67	10.87					7.70	8.30		
ICA	20.73	9.50			10.36	10.18	9.81	10.02	10.20	10.37			9.50	9.81		9.27
LA LIBERTAD	17.41	10.42			10.71	10.55	10.24	10.47	10.54	10.72			8.20	12.78	8.63	
LAMBAYEQUE		10.53				10.63	10.30	10.25	10.40				11.14	10.85	4.40	10.52
LIMA	18.82	9.80	9.70	10.67	10.45	10.09	9.91	10.02	10.12	10.41	10.63	9.95	9.75	7.92	8.31	8.52
LORETO 1/		7.59				8.48	8.25						8.50	10.52	5.68	
MADRE DE DIOS 1/		12.16					9.71									
MOQUEGUA		10.85			7.06		9.98	9.96		11.45			9.61		7.85	8.53
PASCO						12.60	12.00	8.88	9.41				9.46			
PIURA		11.03			10.64	10.20	9.84	10.59	10.79	10.94			9.27	8.82	8.46	3.59
PUNO		10.85					10.20	10.86					11.83			
SAN MARTIN		11.20				11.47	11.16						9.74	9.67		
TACNA														11.43		
UCAYALI 1/						8.99	7.06						8.10	12.10	5.51	

Nota: Solo incluye departamentos donde hay Plantas de Ventas y/o Terminales  
1/ No incluye Impuestos - Ley de Promoción de la Inversión en la Amazonía  
2/ Incluye precios registrados por los Comercializadores de Combustible de Aviación  
Fuente: Datos del PRICE - OSINERGMIN