

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA
PROGRAMA DE MAESTRÍA EN CIENCIAS ENERGÉTICAS
MENCIÓN INGENIERÍA ENERGÉTICA



UNS
ESCUELA DE
POSGRADO

Influencia de la proporción de mezcla aceite ácido residual de pescado con petróleo industrial N° 500, en la eficiencia térmica de calderos industriales

Tesis para optar el grado académico de maestro en ciencias mención
Ingeniería Energética

Autor:

Br. Montañez Montenegro, Carlos Macedonio

Asesor:

Dr. Gonzales Chávez, Salome

Nuevo Chimbote – Perú

2022-06-12



UNS
ESCUELA DE
POSGRADO

CONSTANCIA DE ASESORAMIENTO DE LA TESIS

Yo, DR. SALOME GONZALES CHÁVEZ, mediante la presente certifico mi asesoramiento de la Tesis de Maestría titulada: INFLUENCIA DE LA PROPORCIÓN DE MEZCLA ACEITE ÁCIDO RESIDUAL DE PESCADO CON PETRÓLEO INDUSTRIAL N° 500, EN LA EFICIENCIA TÉRMICA DE CALDEROS INDUSTRIALES, elaborado por el bachiller: CARLOS MACEDONIO MONTAÑEZ MONTENEGRO, para obtener el Grado Académico de MAESTRO EN CIENCIAS MENCION INGENIERIA ENERGETICA en la Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional del Santa.

Nuevo Chimbote, diciembre del 2022



SALOME GONZALES CHÁVEZ

ASESOR

CODIGO ORCID:0000-0003-2327-4621

DNI N°06926519



UNS
ESCUELA DE
POSGRADO

CONFORMIDAD DEL JURADO EVALUADOR

**INFLUENCIA DE LA PROPORCIÓN DE MEZCLA ACEITE ÁCIDO RESIDUAL
DE PESCADO CON PETRÓLEO INDUSTRIAL N° 500, EN LA EFICIENCIA
TÉRMICA DE CALDEROS INDUSTRIALES**

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS ENERGÉTICAS, MENCIÓN
INGENIERÍA ENERGÉTICA**

Revisado y Aprobado por el Jurado Evaluador:

Dr. Gilmer Juan Lujan Guevara

PRESIDENTE (A)

CÓDIGO ORCID:0000-0003-4619-3795

DNI N° 32823443

M.Sc. Julio Hipólito Néstor Escate Ravello

SECRETARIA (O)

CÓDIGO ORCID:0000-0001-9950-2999

DNI N° 32850228

Dr. Gualberto Antenor Mariños Castillo

VOCAL

CÓDIGO ORCID:0000-0001-7514-9908

DNI N° 17890841



UNS
ESCUELA DE
POSGRADO

ACTA DE EVALUACIÓN DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

A los doce días del mes de diciembre del año 2022, siendo las 11:30 horas, en el aula multimedia N° 01 de la Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional del Santa, se reunieron los miembros del Jurado Evaluador, designados mediante Resolución Directoral N° 628-2022-EPG-UNS de fecha 12 de noviembre de 2022, conformado por los docentes: Dr. Gilmer Juan Lujan Guevara (Presidente), Ms. Julio Hipólito Néstor Escate Ravello (Secretario) y Dr. Gualberto Antenor Mariños Castillo (Vocal), con la finalidad de evaluar la tesis titulada: **INFLUENCIA DE LA PROPORCIÓN DE MEZCLA ACEITE ÁCIDO RESIDUAL DE PESCADO CON PETRÓLEO INDUSTRIAL N° 500, EN LA EFICIENCIA TÉRMICA DE CALDEROS INDUSTRIALES**; presentado por el tesista **Carlos Macedonio Montañez Montenegro**, egresado del programa de **Maestría en Ciencias Energéticas mención Ingeniería Energética**.

Sustentación autorizada mediante Resolución Directoral N° 658-2022-EPG-UNS de fecha 06 de diciembre de 2022.

El presidente del jurado autorizó el inicio del acto académico; producido y concluido el acto de sustentación de tesis, los miembros del jurado procedieron a la evaluación respectiva, haciendo una serie de preguntas y recomendaciones al tesista, quien dio respuestas a las interrogantes y observaciones.

El jurado después de deliberar sobre aspectos relacionados con el trabajo, contenido y sustentación del mismo y con las sugerencias pertinentes, declara la sustentación como: Aprobado asignándole la calificación de: Dieciocho (18).

Siendo las 12:40 horas del mismo día se da por finalizado el acto académico, firmando la presente acta en señal de conformidad.

Dr. Gilmer Juan Lujan Guevara
Presidente

Ms. Julio Hipólito Néstor Escate Ravello
Secretario

Dr. Gualberto Antenor Mariños Castillo
Vocal



Recibo digital

Este recibo confirma que su trabajo ha sido recibido por **Turnitin**. A continuación podrá ver la información del recibo con respecto a su entrega.

La primera página de tus entregas se muestra abajo.

Autor de la entrega:	Carlos Montañez
Título del ejercicio:	pruebas
Título de la entrega:	Influencia de la proporción de mezcla aceite ácido residual ...
Nombre del archivo:	TESIS_FINALIZADA_Maestria_2022_Turnitin.pdf
Tamaño del archivo:	1.71M
Total páginas:	128
Total de palabras:	25,152
Total de caracteres:	122,222
Fecha de entrega:	07-feb.-2023 05:23p. m. (UTC-0500)
Identificador de la entre...	2008826574



DEDICATORIA

AL GRAN PADRE ETERNO, por la vida, las experiencias y sus misterios.

A mis hijos; quienes hicieron la luz para mi camino

CARLOS & HANNA

A mis padres, por su cariño y apoyo.

FLOR & MACEDONIO

A la memoria eterna de mi abuela, por la inspiración.

PATRICIA

A la memoria eterna de quien significó un gran padre, maestro y amigo.

JOSE CELSO PADILLA FLORES

“El Profe”

A mis familiares y amigos, en general.

AGRADECIMIENTOS

A mi asesor, Dr.

SALOME GONZALES CHAVEZ

Por sus conocimientos impartidos durante los estudios de posgrado y su orientación técnica y metodológica para la elaboración y desarrollo del informe de tesis.

A los docentes de la E.P. INGENIERIA EN ENERGIA, de la especialidad de FISICA, y docentes de las áreas formativas afines, por el aporte de sus conocimientos durante la formación en el programa de Maestría.

ÍNDICE GENERAL

Constancia de asesor de tesis	i
Conformidad del jurado evaluador	ii
Acta de evaluación de sustentación de tesis	iii
Recibo digital Turnitin	iv
Dedicatoria	v
Agradecimientos	vi
Índice general	vii
Índice de tablas	x
Índice de figuras	xi
Índice de gráficos	xii
Índice de anexos	xiii
Resumen	xiv
Abstract	xv
CAPÍTULO I	01
PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	01
1.1 Planteamiento y fundamentación del problema de investigación	02
1.2 Antecedentes de la investigación	03
1.3 Formulación del problema de investigación	04
1.4 Delimitación del estudio	04
1.5 Justificación e importancia de la investigación	05
1.6 Objetivos de la investigación: General y específicos	10
CAPÍTULO II	11
MARCO TEÓRICO	12
2.0 Combustión	13
2.1 Características de la combustión	13
2.1.1 Realización de combustión	14
2.1.2 Estequiometría de la combustión	14
2.1.3 Combustión completa	15
2.1.4 Combustión incompleta	15
2.1.5 Combustión estequiométrica	15
2.1.6 Poder comburívoro	15
2.1.7 Poder fumígeno	15
2.1.8 Coeficiente de exceso de aire	16
2.1.9 Poder calorífico inferior	16

2.1.10 Poder calorífico superior	16
2.1.11 Rendimiento de la combustión	17
2.2 Combustión de hidrocarburos	17
2.2.1 Generador de vapor o caldero	18
2.2.2 Cámara de combustión	18
2.2.3 El petróleo industrial N° 500	18
2.3 Atomización de combustible residual	20
2.3.1 Energía y tipo de atomización	20
2.3.2 Evaluación de atomizadores comerciales para petróleo residuales	20
2.4 Caracterización de petróleo residuales	22
2.4.1 Petróleo crudo	23
2.4.2 Estado físico	24
2.4.3 Composición química	25
2.5 Marco conceptual	27
CAPÍTULO III	29
MARCO METODOLÓGICO	29
3.1. Hipótesis central de la investigación	30
3.2. Variables e indicadores de la investigación	30
3.2.2 Definición conceptual de las variables	30
3.3. Método de investigación	30
3.4. Diseño o esquema de la investigación	30
3.4.1. Diseño para proceso experimental en laboratorio	31
3.4.2 Diseño para el proceso de aplicación de campo	33
3.5 Población y muestra	34
3.6 Actividad del proceso investigativo	34
3.6.1. Ensayos para determinar el PC de mezclas	34
3.6.2 Pruebas de miscibilidad de mezclas de aceite y P.I.500	39
3.6.3 Metodología para determinar el PC de mezclas	41
3.7 Técnicas e instrumentos de la investigación	41
3.8 Procedimiento para la recolección de datos	41
3.8.1 Sistema de combustión, quemador y caldero	42
3.8.2 Tanque de almacenamiento para mezcla combustible	42
3.8.3 Proporciones de mezclas a combustionar	44
3.8.4 Instrumentación y mediciones	45
3.9. Técnicas de procesamiento de los datos	45

CAPÍTULO IV	46
RESULTADOS Y DISCUSIONES	46
4.1 Estudio calorimétrico de aceite ácido residual y petróleo industrial 500	47
4.1.1 Registro de temperatura en función del tiempo de calentamiento	48
4.1.2 Análisis del cambio de temperatura y tiempo de calentamiento	48
4.1.3 Cálculo del poder calorífico superior	50
4.1.4 Cálculo del poder calorífico inferior	50
4.2 Resumen de cálculo de poderes caloríficos	51
4.3 Perfil de calentamiento de mezclas combustibles	52
4.4 Análisis de temperatura en función al tiempo de transición	55
4.5 Análisis estequiométrico y determinación de entalpías de combustión de mezclas	58
4.6 Composición química del aceite de pescado	87
4.7 Composición de gases de combustión a 30% aceite ácido residual y 70% P.I 500	88
4.8 Determinación del exceso de aire y eficiencia térmica en caldera de 900 BHP	89
4.9 Análisis del exceso de aire	90
4.10 Determinación de la eficiencia térmica en el caldero de 900 BHP	94
4.11 Resultado de analizador de gases de combustión	94
4.12 Límites máximos permisibles según NTP.350.301.2009	97
4.13 Parámetros medioambientales	97
4.14 Costo de operación y análisis económico	98
4.15 Discusiones	100
CAPÍTULO V	103
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	103
5.1 Conclusiones	104
5.2 Recomendaciones	105
6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	106
ANEXOS	108

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Caracterización de componentes de gases de combustión	17
Tabla 2. Propiedades fisicoquímicas del petróleo industrial 500	18
Tabla 3. Composición de C, H, S y cenizas de combustión	25
Tabla 4. Relación de carbono e hidrógeno de combustibles	25
Tabla 5. Constituyentes de combustibles en ppm y cenizas	26
Tabla 6. Relación de porcentajes de mezclas de combustibles	44
Tabla 7. Proporción de combustibles para mezclas	44
Tabla 8. Registro de datos para muestras de aceite ácido residual de pescado	48
Tabla 9. Resumen de valor de PCS y PCI para combustibles puros y mezclados	51
Tabla 10. Tiempo de transición(min), temperatura (°C) en bomba calorimétrica	55
Tabla 11. Convergencia de temperatura de llama adiabática para P.I.500	62
Tabla 12. Convergencia de temperatura de llama adiabática para AAR.	67
Tabla 13. Convergencia de temperatura de llama adiabática, mezcla 20% AAR y 80% P.I 500	72
Tabla 14. Convergencia de temperatura de llama adiabática, mezcla 30% AAR y 70% P.I 500	77
Tabla 15. Datos de combustibles líquidos	87
Tabla 16. Composición de petróleo industrial 500	87
Tabla 17. Residuos de los combustibles reactantes	88
Tabla 18. Composición de gases de combustión a 30% de AAR y 70% P.I.500	88
Tabla 19. Exceso de aire medido con analizador de gases a 30% de AAR y 70% P.I.500	89
Tabla 20. Interpolación de entalpías	92
Tabla 21. Datos de analizador de gases	94
Tabla 22. Pérdida de calor por calor sensible en gases secos	94
Tabla 23. Pérdida por entalpía de vapor de agua en los gases	95
Tabla 24. Pérdida por inquemados gaseosos	95
Tabla 25. Pérdida por inquemados sólidos	95
Tabla 26. Pérdidas por convección	96
Tabla 27. Pérdidas por radiación	96
Tabla 28. Límite máximo permisible para calderas de vapor de uso industrial	97
Tabla 29. Equivalencia de unidades	97

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Elementos de la combustión	12
Figura 2. Cámara y llama de combustión	18
Figura 3. Atomización de petróleo industrial	20
Figura 4. Atomizador de petróleo industrial	22
Figura 5. Partes de un atomizador de Petróleo industrial	23
Figura 6. Petróleo industrial 500	24
Figura 7. Aceite ácido residual de pescado	34
Figura 8. Pesado de muestras de aceite ácido	35
Figura 9. Alambre de ignición de cobre revestido con aluminio 1400 Cal/g	35
Figura 10. Inserción de cazoleta en reactor	36
Figura 11. Llenado de agua mediante probeta graduada	36
Figura 12. Verificación de llenado de agua hasta tapa superior de bomba calorimétrica	37
Figura 13. Balón de oxígeno de 10 m ³	37
Figura 14. Apertura de balón de oxígeno regulando la presión	38
Figura 15. Instalación de cables terminales para conducción de corriente	38
Figura 16. Instalación de bomba calorimétrica	39
Figura 17. Pruebas de acidez	39
Figura 18. Pruebas de miscibilidad	40
Figura 19. Muestras en reposo	40
Figura 20. Sistema de instalación de tanque y tuberías de suministro	43

INDICE DE GRÁFICOS

Gráfica 1. Diseño para procesos experimentales- laboratorio	45
Gráfica 2. Diseño para el proceso de aplicación en campo	47
Gráfica 3. Perfil de temperatura para muestra de aceite ácido puro	52
Gráfica 4. Perfil de temperatura para muestra de 20% aceite ácido y 80% P.I 500	52
Gráfica 5. Perfil de temperatura para muestra de 30% aceite ácido y 70% P.I 500	53
Gráfica 6. Perfil de temperatura para muestra de 40% aceite ácido y 60% P.I 500	54
Gráfica 7. Perfil de temperatura para muestra de 50% aceite ácido y 50% P.I 500	54
Gráfica 8. Evolución de los tiempos de transición y sus temperaturas	56
Gráfica 9. Evolución del poder calorífico superior y proporciones de mezclas	57
Gráfica 10. Evolución del poder calorífico inferior y proporciones de mezclas	57
Gráfica 11. Entalpías de combustión considerando agua en fase de vapor y líquido	84
Gráfica 12. Comparación de PCI obtenido mediante ecuaciones y entalpías de combustión	85
Gráfica 13. Temperatura de llama adiabática de los combustibles	86

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Instrumentos de recolección de datos

Anexo 2. Datos de análisis de combustión de mezcla a 30% AAR y 70% P.I. N.º 500

RESUMEN

El aceite ácido residual recuperado del procesamiento de harina de pescado se utiliza mezclado con petróleo industrial N° 500. El estudio se orienta a caracterizar sus propiedades en función a la proporción de mezcla para determinar el poder calorífico óptimo de combustión para su uso en calderas pirotubulares. La investigación comprende dos etapas; la primera orientada a caracterizar las propiedades fisicoquímicas y la segunda etapa orientada a experimentación de campo utilizando mezcla de aceite ácido residual y petróleo industrial 500 para analizar la composición de gases de combustión y sus efectos en la eficiencia térmica de la caldera de 900 BHP.

La metodología de investigación es básica con diseño experimental con estímulo creciente y muestra control (aceite ácido residual y petróleo industrial 500), y aplicada por su finalidad porque de sus resultados óptimos de mezcla, se obtiene la relación que se usará en la combustión en una caldera de 900 BHP, para procesar la información se dispuso del método del balance térmico y de masa a partir de la primera ley de la termodinámica y el método de balance estequiométrico, entalpías de combustión asociado al cálculo de temperatura teórica o de llama adiabática.

Los resultados indican que la relación de mezcla al 30% de aceite ácido residual con 70% de Petróleo Industrial 500, determina el mayor poder calorífico superior en condiciones obtenidas en el laboratorio corroborándose que en el tiempo de transición de 4 minutos después de combustionar en la bomba calorimétrica registrando su máximo en 26.98°C, con un valor de entalpía de combustión de 8898.85 kCal/kg y una temperatura de llama adiabática de 3416.12 K (3143.05 °C). Al realizar la combustión en la caldera de 900 BHP se obtuvo mediante cálculo una temperatura de llama adiabática de 2112.5714 K (1839.42°C), La eficiencia de combustión registrada por el analizador es de 87.9% y la eficiencia térmica del caldero pirotubular de 900 BHP calculada es 83.58%.

Los indicadores ambientales muestran que el nivel de dióxido de azufre medido incumple la NTP 350.301-2009 en 49.4% determinándose la razón del efecto corrosivo en las estructuras expuestas a este gas, además el ahorro económico por el uso del 30% de aceite ácido residual con 70% de petróleo industrial 500, permite un ahorro de 214 soles por hora de operación considerando que el caldero consume 150 galones de combustible por hora durante 20 horas de operación al día, durante 6 meses al año con un costo de galón de petróleo industrial 500 de 4,75 soles, se obtiene un ahorro anual de 769,160.0 soles.

Palabras clave: Aceite ácido residual de pescado, petróleo industrial 500, mezcla, poder calorífico, eficiencia.

ABSTRACT

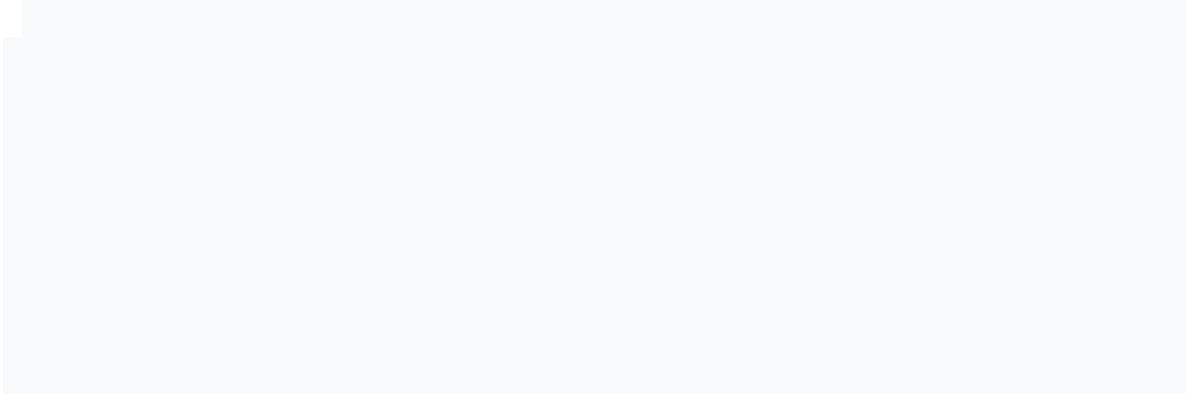
The residual acid oil recovered from the processing of fishmeal is used mixed with industrial oil N°. 500. The study is aimed at characterizing its properties based on the mixing ratio to determine the optimal calorific value of combustion for use in fire-tube boilers. The investigation comprises two stages; the first aimed at characterizing the physicochemical properties and the second stage aimed at field experimentation using a mixture of residual acid oil and Industrial Oil 500 to analyze the composition of combustion gases and their effects on the thermal efficiency of the 900 BHP boiler.

The research methodology is basic with an experimental design with increasing stimulus and control sample (residual acid oil and industrial oil 500), and applied for its purpose because of its optimal mixing results, the relationship that will be used in the combustion in a 900 BHP boiler, to process the information, the thermal and mass balance method was used from the first law of thermodynamics and the stoichiometric balance method, combustion enthalpies associated with the calculation of theoretical temperature or adiabatic flame

The results indicate that the 30% mixture ratio of residual acid oil with 70% of Industrial Oil 500, determines the highest calorific value under conditions obtained in the laboratory, corroborating that in the transition time of 4 minutes after combustion in the bomb calorimeter registering its maximum at 26.98°C, with a combustion enthalpy value of 8898.85 kCal/kg and an adiabatic flame temperature of 3416.12 K (3143.05 °C). When carrying out the combustion in the 900 BHP boiler, an adiabatic flame temperature of 2112.5714 K (1839.42°C) was obtained by calculation. The combustion efficiency registered by the analyzer is 87.9% and the thermal efficiency of the firetube boiler of 900 BHP calculated is 83.58%.

The environmental indicators show that the level of sulfur dioxide measured does not comply with NTP 350.301-2009 in 49.4%, determining the reason for the corrosive effect on the structures exposed to this gas, in addition to the economic savings due to the use of 30% of residual acid oil with 70% industrial oil 500, allows a saving of 214 soles per hour of operation considering that the boiler consumes 150 gallons of fuel per hour during 20 hours of operation a day, for 6 months a year with a cost of a gallon of Industrial Oil 500 of 4.75 soles, an annual saving of 769,160.0 soles is obtained.

Keywords: Residual acid fish oil, industrial petroleum 500, mixture, calorific value, efficiency



CAPÍTULO I
PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1 PLANTEAMIENTO Y FUNDAMENTACIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

El aceite ácido residual de pescado es un subproducto del procesamiento de harina de pescado y representa por sus propiedades un recurso energético importante si se analiza su potencial como combustible para generar calor a partir de su mezcla con petróleos residuales para su utilización en equipos térmicos como calderos y hornos industriales.

Según Valenzuela B, et all, en su artículo “El aceite de pescado: ayer un desecho industrial, hoy un producto de alto valor nutricional, sostiene que también se empleaba en Chile, Dinamarca y Noruega, siendo este protagonista de alta relevancia en la segunda guerra mundial donde el puerto Narvik de Noruega fue bombardeado por fuerzas aliadas en 1940 para evitar que los depósitos de aceite de pescado fueran empleados como combustible por los invasores alemanes.

Se tiene conocimiento de que el aceite de pescado como combustible mezclado con petróleos residuales se empleó entre 1970 y 1980 en la industria pesquera y actualmente se sigue utilizando en los procesos térmicos aunque con menor frecuencia para la generación de calor siendo su beneficio directo, el ahorro económico pero con la desventaja de desconocerse sus propiedades como combustible para su utilización en óptimas condiciones , por lo cual es necesario su caracterización energética para determinar la relación de mezcla adecuada para optimizar la combustión.

Sin embargo por la experiencia de operadores e ingenieros de producción y mantenimiento, se conoce que al combustionar la mezcla de aceite ácido y petróleo industrial N° 500, se genera una cantidad significativa de cenizas que favorece a la condensación de los gases de combustión , formando ácidos corrosivos cuyo efecto particular se le atribuye al aceite ácido de pescado que estaría combustionando de forma ineficiente ,se intenta explicar el fenómeno analizándose sus propiedades a partir de su densidad, viscosidad cinemática , pH, y sus propiedades de miscibilidad y compatibilidad de mezcla con el petróleo industrial, caracterizándose también su composición química a partir carbonos e hidrógenos saturados y moléculas de oxígeno que le dan la propiedad de ser un auto inflamable cuya característica puede influenciar en el adelanto o retraso de la combustión cuando esta se mezcla con petróleo industrial siendo importante determinar su punto de inflamabilidad, punto de combustión y poder calorífico ,al momento de combustionar como mezcla .Esta particularidad del aceite ácido puede ayudar a explicar una posible diferencia de

temperaturas en la mezcla así como los tiempos de inflamación de ambos fluidos combustible siendo probable que el aceite ácido se inflame antes que el petróleo industrial N° 500, generando deficiencia en la combustión de la mezcla.

1.2 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

Gobernado Arribas, I. (2012). Combustión de mezclas de gasóleo y aceites vegetales para su uso como combustible en calderas de baja potencia. Determinó que el poder calorífico inferior en todas las pruebas ejecutadas indican una cantidad de carbono inferior a la del gasóleo, y que tal reducción queda equilibrada con el incremento de oxígeno en el combustible mediante el exceso de aire y se consigue una mejora en el rendimiento de la combustión al reducir pérdidas por los gases y referido a las condiciones de la combustión con 216 ensayos, los factores que interviene en el análisis son el tipo de aceite, el porcentaje de la mezcla, la presión de inyección y el caudal de aire y respecto a las emisiones tienden a crecer a medida que se aumenta el porcentaje de aceite en el nivel de nitrógeno y sobre todo el contenido de oxígeno de combustible incrementa la temperatura de combustión, la produce NO_x , en estas condiciones se alcanzan un 4.5 % de incremento de eficiencia si se utiliza la proporción del 34% de aceite presente en gasóleo.

Bulla-Pereira, E. A., et al (2015). Producción de biodiésel por etanolisis utilizando aceites de fritura de hoteles y su uso en calderas pirotubulares. *Iteckne*, 12(1), 44-53. Determinó en su estudio concluye que las propiedades del biodiesel son altamente influenciados por la composición del índice de acidez (7.65mg KOH/g aceite), viscosidad(25.65mm²/s) y densidad 921.5kg/m³) del aceite usado de fritura empleado como materia combustible mostrando mayores ventajas que las propiedades del biodiesel(viscosidad 4.45mm², densidad 899 kg/m³, índice de acidez 0.39 mg/KOH/g aceite). Su contenido posee propiedades adecuadas para su uso como combustible en caldera y permite una disminución del 2.3% de CO_2 .

Mesa, E. L., García, J. S., & Estébanez, J. B. (2000). Estudio de modificaciones geométricas en boquillas de calderas piro y acuotubulares para la combustión eficiente de crudos pesados. *Ingeniería Mecánica*, 3(3), 7-18. Demostró en su estudio que el incremento del ángulo en la ranura del dosificador de las boquillas pirotubulares reflejó un resultado superior en las pruebas en frío (mejor calidad de spray) y en caliente (mayor eficiencia de la combustión). Las variantes de boquillas de terminal circular aportan resultados superiores que los de boquilla ovaladas sobre todo con las pruebas en caliente la que la circularidad genera mejores distribuciones de las presiones a la salida de la boquilla y a su vez más

uniformidad del spray . El método experimental empleado deberá repetirse con el aceite ácido residual puro para completar el estudio y preparar las condiciones para optimizar la variante a emplear con las mezclas de crudo nacional.

1.3 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

¿De qué manera influirá la proporción de aceite ácido residual de pescado mezclado con petróleo industrial N° 500, en la eficiencia térmica de calderos industriales?

1.4 DELIMITACIÓN DEL ESTUDIO

Sobre la composición del aceite ácido residual y su mezcla

La investigación está dirigido a determinar solo el potencial y se tiene el objetivo de mejorar las propiedades combustibles, se hará énfasis solo en la combustión a diversas proporciones para dos etapas una relacionado a determinar sus propiedades fisicoquímicas de mezcla en el laboratorio y la otra etapa comprende las pruebas experimentales de combustión de las mezclas a través de un caldero pirotubular.

Sobre el alcance y cobertura para su uso industrial como mezcla combustible alternativo

La investigación tiene como objetivo el uso y aplicación a sistemas de combustión de calderos pirotubulares y hornos de mediana escala, esta etapa de estudio preliminar servirá de enfoque y línea base para estudios posteriores orientados a sistemas de combustión de mayor capacidad como calderos acuotubulares y hornos cementeros, cuya posibilidad de aplicación dependerá de los resultados a obtenerse para estandarizar su uso y ampliar el campo de acción como combustible.

1.5 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACIÓN

- JUSTIFICACIÓN CIENTÍFICA Y METODOLÓGICA

Según Bunge, M. (1960), en su tratado “La ciencia, su método y su filosofía”, la experimentación involucra la modificación deliberada de algunos factores, es decir, la sujeción del objeto de experimentación a estímulos controlados, pero lo que habitualmente se llama “método experimental”.

En ese contexto podemos aseverar que la manipulación de esos factores se refiere a variables operacionales que más influyen y que se han identificados como causales de jerarquía en relación al objeto de estudio como problema de carácter científico y que de esta se delimita y planifican las acciones a desarrollarse, así también cuando Bunge se refiere a modificaciones deliberadas de algunos factores hace referencia a que el investigador decide a criterio racional, la forma en que manipulará la variable independiente sostenido en la teoría o conocimiento que de ella se ocupa, los estudios de casos similares que lo anteceden, el estado de arte y el campo de acción donde interacciona el objeto de estudio y su problema.

A partir del tratamiento del problema se considera a posterior un rubro de problemas abiertos, después de las conclusiones y recomendaciones relativos a los trabajos que le proseguirán y que no fueron tratados en la investigación debido a la necesaria delimitación del caso de estudio, como lo sostiene Gonzales, S. (2015), en su guía “Reglas para redacción final de tesis de maestría y doctorado”, concluyéndose que el investigador tiene dominio de la base teórica y está informado de la literatura científica que le servirá para explicar a posterior los resultados que deberán soportar el rigor científico para validarlas ya que el método y la técnica predisponen a que los procesos sean sistematizados, repetible y admitan la comprobación de sus resultados, en ese contexto se reducen ambigüedades de definición, delimitación, alcance y en consecuencia de interpretación como lo sostiene también el profesor Rojas Flores, A. (2012) en sus apunte del curso Seminario de Investigación.

Así mismo Bunge se refiere a que no solo los experimentos pueden estar sujeto a procedimientos estrictamente sujetos a protocolos de laboratorios, se deduce que los trabajos experimentales pueden llevarse a situaciones de campo sin descuidar los procedimientos que los vincule y es aquí en esta etapa donde se sostiene que el método científico garantiza que esos procedimientos de laboratorios puedan extrapolarse al campo aplicado sean estos desarrolladas en plantas industriales donde se dan los procesos problemáticos in situ.

Es aquí donde se introduce la selección del método y la técnica para justificar el diseño apropiado de la investigación cuyos procedimientos vinculen características de las variables de estudio que puedan ser interpretadas en indicadores consistentes como una medida del cambio que experimenta una variable de estudio, justificando el diseño en dos etapas de la investigación, una experimental desarrollada en el laboratorio y la otra de diseño para la ejecución en campo.

Según Tresierra , A. (2015) en su libro, “Metodología de Investigación Científica”, considerándose que el estímulo creciente es la proporción de mezcla aceite ácido en petróleo industrial 500 que va desde el 20% al 50% y fijando como muestra control las características fisicoquímicas del aceite y el petróleo industrial 500 en sus estados puros que resultan del experimento del poder calorífico desarrollado en una bomba calorimétrica cuyos resultados se extrapolarán a sus proporciones reales en la etapa de campo según la capacidad de consumo de combustible del caldero pirotubular.

- JUSTIFICACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA

Se ha considerado que la variación porcentual de aceite ácido residual de pescado influirá en el potencial energético al mezclarse con petróleo industrial 500, en la cual el análisis de la mezcla tiene múltiples vías para justificar su estudio por ejemplo en los costos operativos que se debe considerar respecto al mantenimiento de los calderos pirotubulares ya que si no se caracteriza adecuadamente ni se determinan los componentes que se producen en los gases de combustión , pueden ocasionar mayores costos para su mantenimiento generando desventajas técnicas y económicas para su operación considerando que el aceite ácido residual tiene un valor inicial de acidez y humedad y esta hace posible que el trabajo de mantenimiento sea cada vez más continuo generando desventajas técnicas, económicas y baja confiabilidad de operación.

Otra razón que puede justificar su estudio de mezcla es su costo relativamente bajo al ser un subproducto de recuperación de aceite que no tiene valor comercial, a comparación del costo del petróleo industrial 500, el aceite ácido residual reduciría el costo de operación y tendría mayor ahorro en la medida que el aumento de la proporción de mezcla lo amerite técnicamente en la combustión.

En cuanto a estudios antecedentes, el ingeniero Percy Castillo Neira (2015), informa que el aceite ácido de pescado combustiona perfectamente y se puede utilizar al 100% como combustibles de caldera, tal es el caso que sus resultados concretados en la Empresa

Exalmar –Callao, con registro de solicitud y permisos para usos de combustible para aceite ácido residual de pescado lo afirman, con registro en Indecopi.

La investigación es de importancia porque contribuirá a caracterizar el potencial energético del aceite residual como combustible, a través de la proporción de mezcla óptima manifestando sus propiedades. Se detallan las características o aspectos importantes sobre el estudio del aceite residual, respecto a su vigencia y utilidad en la industria, actualmente existe una línea industrial dedicado a la refinación y semirrefinación del aceite de pescado, donde estas se acopian en tanques para su almacenamiento y procesamiento.

- IMPORTANCIA SOBRE NUEVAS ALTERNATIVAS DE COMBUSTIBLES INDUSTRIALES

La posibilidad de demostrar que las propiedades fisicoquímicas es viable técnica y operativamente establece ventajas para su utilización en el sector industrial conservero y pesquero, siendo este un recurso empleado desde la década de 1970 hasta la actualidad, los primeros análisis fisicoquímicos realizados sobre su comportamiento como mezcla hacen posible que su uso en equipos de combustión sea eficiente y confiable.

- IMPORTANCIA EN LOS COSTOS OPERATIVOS

Uno de las ventajas directas de su utilización como mezcla es el ahorro económico, a medida que la proporción de mezcla del aceite aumenta presentará mayores ahorros, dependiendo si es que el aumento de aceite se comporta directamente proporcional en el poder calorífico de mezcla.

El análisis reportará ventajas económicas en cualquiera de la relación de mezcla que se utilice siendo más conveniente su aumento en la concentración a medida que el poder calorífico también se incremente, al menos hasta el punto óptimo de combustión.

- IMPORTANCIA EN LA EFICIENCIA, CALIDAD Y CONFIABILIDAD OPERATIVA

Sabiendo que el aceite contiene oxígeno en su cadena molecular es justificable su propiedad de ser un fluido auto inflamable sus variables se aproximan a su límite de inflamación , a diferencia de los hidrocarburos estas necesitan oxígeno para completar la reacción , de aquí se toma un punto de análisis de la combustión como mezcla buscando que la oxidación de ambos combustibles sea teóricamente en tiempos iguales , por ello el estudio fisicoquímico ayudará a predecir si la mezcla puede producir fases al momento de calentarse y someterse

a presión a través del sistema de alimentación , existiendo la posibilidad de disociación generando fases cuyas diferencias de densidades influiría directamente en la calidad de atomización del combustible siendo posible que el petróleo combustione antes que el aceite ácido residual .

Las pruebas realizadas en el laboratorio establecen que el aceite ácido residual y el petróleo industrial a temperatura de ambiente presentan resultados favorables de miscibilidad y homogeneidad no se disocian ni forman compuestos , esta conclusión se llega luego de analizar la mezcla entre el 50% de cada combustible con un tiempo de reposo de 2 minutos, consideramos que el tiempo de prueba realizada es solo una etapa preliminar ya que cuando se prepare la mezcla para combustionarse experimentalmente en un caldero , el tanque de abastecimiento con la mezcla permanecerá mucho más tiempo en reposo previendo para ello un sistema de agitación para romper la formación de fases debido a las diferencias de densidades que poseen ambos combustibles.

Si se analiza a cualquiera de las mezclas en reposo superior a los 2 minutos hay la posibilidad de que se formen separación o fases y den por inicio a formación de borra producto de la interacción de carbonos y ácidos del aceite, para ello se contará con un sistema de agitación para uniformizar la mezcla.

La eficiencia de combustión será establecida en la medida que la proporción de mezcla desarrolle el máximo poder calorífico inferior, según los antecedentes se puede hallar entre el 20 % a 50% de mezcla el cual se demostrará.

La calidad y confiabilidad se logrará a medida que las mezclas determinen la composición de gases , si los resultados de la composición de gases no es la que se espera o no se encuentran dentro de los rangos esperados, se realizaran medidas correctivas a través de ajustes de exceso de aire para intentar completar la reacción sobre todo del aceite ácido, a breve análisis se puede inducir que el aceite presentará singular resistencia a la combustión por su densidad , se espera que esta se corrija en la etapa de precalentamiento y escogiendo la mezcla con el nivel de acidez adecuada , estas dos condicionantes intentaran ser ajustadas con el exceso de aire hasta obtener un punto de combustión óptimo , cabe indicar que no se pretende igualar el poder calorífico del petróleo industrial 500 sino más bien acercarse al punto óptimo de eficiencia como mezcla.

- INFLUENCIA DEL CALENTAMIENTO DE LA MEZCLA EN LA FORMACIÓN DE COMPUESTOS VISCOSOS O PARTÍCULAS.

Si se tuvo en cuenta que el tanque de combustible que contendrá la mezcla ,deberá de tener un sistema de agitación , se sabe que la mezcla ingresará al quemador precalentada a una temperatura aproximada entre 100°C y 115°C para mejorar la fluidez y reducir la densidad de mezcla incluso liberando elementos volátiles del aceite ,en este caso liberando oxígeno de su cadena molecular y sustancias contaminantes propias de pigmentos que le dan el color característico al aceite y que serán retenidas a través de un sistema de filtrado convencional, se sabe que el calentamiento tiene por objetivo mejorar la fluidez del combustible pero a la vez mejora las condiciones fluido dinámicas de la mezcla corrigiendo el fenómeno de formación de borra o masas densas al disolverlas.

- IMPORTANCIA NORMATIVO AMBIENTAL

Para establecer cuáles serán los productos de la combustión que serán analizados en función a su concentración, se establecerá una ecuación que representará el proceso simple de oxidación, siendo la siguiente.



Siendo caracterizado de la siguiente manera:

x: porcentaje de aceite ácido residual

y: porcentaje de petróleo industrial N° 500

$\text{C}_{16.6}\text{H}_{30.2}\text{O}_{0.02}\text{S}_{0.009}$: Es la composición de combustible residual N °500.

El coeficiente A, hace referencia al exceso de aire inicial con la que se ira realizando los ajustes de combustión para ayudar a completar la reacción probablemente del aceite ácido residual.

B, D y E son los coeficientes del producto de la combustión que indicarán la proporción de componentes presentes en los gases y serán evaluadas para determinar la calidad de combustión y otros indicadores.

1.6 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACION: GENERALES Y ESPECIFICOS

1.6.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar la influencia del aceite ácido residual de pescado mezclado con Petróleo industrial N° 500, en la eficiencia térmica de calderos industriales.

1.6.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar la composición fisicoquímica de las mezclas combustibles.
- Determinar el poder calorífico superior e inferior y las entalpías de combustión de las mezclas.
- Obtener la relación de mezcla óptima de combustión mediante experimento en una bomba calorimétrica.
- Determinar la temperatura de llama adiabática de las mezclas experimentales y de la relación óptima de mezcla aplicada para combustión en la caldera de 900 BHP.
- Determinar los indicadores de eficiencia, costos operativos y parámetros ambientales.

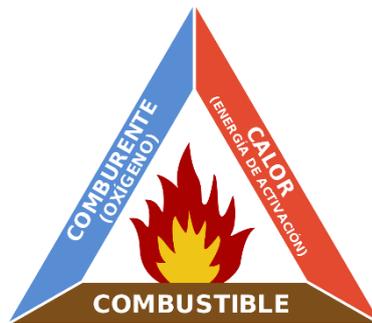
CAPÍTULO II
MARCO TEÓRICO

2.0 COMBUSTIÓN

Se define como el proceso químico de reacción entre un combustible y un agente oxidante o comburente que libera calor y forma otros compuestos o residuos.

Figura 1

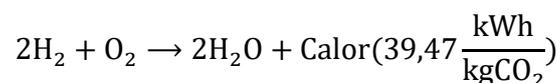
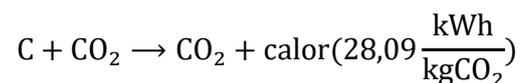
Elementos de la combustión



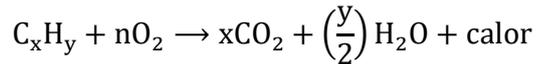
Nota: Triángulo de la combustión. *Extraído de la página <http://www.aelaf.es/el-triangulo-del-fuego/>*

Estos factores integran el triángulo de combustión, en el cual se tiene que obtener los tres elementos para desarrollarse. El comburente más utilizado es el oxígeno y en aplicaciones se utiliza el aire como comburente y conforma aproximadamente el 21% oxígeno (O₂) y 79% Nitrógeno (N₂); en situaciones especiales se acondicionan atmósferas enriquecidas en oxígeno e incluso oxígeno puro. La energía de activación es el elemento desencadenante de la reacción de combustión; en los quemadores habitualmente suele obtenerse mediante una chispa eléctrica entre dos electrodos, en las calderas individuales de gas se obtiene por llama piloto, tren de chispas, etc.

En su mayoría los combustibles están compuestos, básicamente, por Carbono (C) e Hidrógeno (H); además de estos componentes principales tienen otros como azufre (S), humedad (H₂O), cenizas, etc. En primer lugar, se analiza la combustión desde el punto de vista de sus componentes fundamentales (C, H); posteriormente se comentará la influencia de los restantes elementos. Las reacciones de combustión son:



En las aplicaciones se estructuran de la forma C_xH_y, dando lugar a las siguientes reacciones.



2.1 CARACTERÍSTICAS DE LA COMBUSTIÓN

La aparición de la llama es tan representativa que, aun a pesar de reconocer la existencia de llamas invisibles, de llamas finas, etc., se puede restringir el estudio de la combustión a los procesos con llama, dejando los otros procesos de oxidación exotérmica antes mencionados para un análisis más general de procesos reactivos. Un ejemplo cercano y muy instructivo de estos procesos de oxidación exotérmica (combustión sin llama) lo constituyen las estufas catalíticas, donde un flujo de butano (la combustión catalítica de otros hidrocarburos no está tan desarrollada) es dirigido a una matriz porosa (p.e. de alúmina) donde se encuentra el catalizador (p.e. platino) a la que también llega aire ambiente; si el catalizador está frío no hay reacción, pero basta con que se caliente la matriz hasta unos 500 K (aunque la temperatura de funcionamiento normal es de unos 750 K) para que la mayor parte del butano reaccione con el oxígeno en la superficie del catalizador y genere calor suficiente para mantener la matriz caliente frente a las pérdidas de calor al ambiente.

Las variables que influyen en el proceso de combustión son:

- La composición (relación combustible/aire y relación gas inerte/comburente)
- La temperatura
- La presión
- El campo de velocidades

El uso de catalizadores (sustancias que, aunque no parecen reaccionar, porque no se consumen, controlan el progreso de la reacción).

De hecho, relativo a este último punto, la simple presencia de un sólido en las proximidades de una llama altera fuertemente el equilibrio térmico y de especies activas, estabilizando la posición de la llama o llegando a apagarla.

2.1.1 REALIZACIÓN DE LA COMBUSTIÓN

Existen dos formas distintas de desarrollar la combustión controlada.

- Quemando en régimen discontinuo una pequeña cantidad (motores alternativos y pulsorreacciones). Si es en grandes cantidades se considera combustión incontrolada y se llama fuego.

- Quemado en régimen estacionario en una llama anclada (velas, candiles, mecheros, cámaras de combustión continua, en lechos fluidizados, etc., hasta las hogueras pueden considerarse de este tipo.

2.1.2 ESTEQUIOMETRIA DE LA COMBUSTIÓN

La estequiometría de la combustión se ocupa de las relaciones másicas y volumétricas entre reactivos y productos. Los aspectos a determinar son principalmente:

- Aire necesario para la combustión
- Productos de la combustión y su composición

Para predecir estas cantidades es preciso referirse a un proceso ideal que dependa de unos pocos parámetros, básicamente la naturaleza del combustible. Para definir este proceso ideal se consideran los tipos de combustión que pueden darse:

2.1.3 COMBUSTIÓN COMPLETA

Conduce a la oxidación total de todos los elementos que constituyen el combustible. En el caso de hidrocarburos:

- Carbono → CO_2
- Hidrogeno → H_2O
- Azufre → SO_2
- Nitrógeno → N_2
- Oxígeno → Participará como oxidante

El nitrógeno se considera como masa inerte, si bien a las altas temperaturas del humo pueden formarse óxidos de nitrógeno en pequeñas proporciones (del orden de 0,01%).

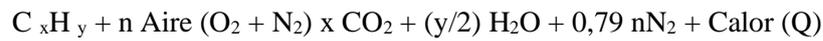
2.1.4 COMBUSTIÓN INCOMPLETA

Los componentes del combustible no se oxidan totalmente por lo que aparecen los denominados inquemados, los más importantes son CO y H_2 ; otros posibles inquemados son carbono, restos de combustible, etc.

2.1.5 COMBUSTIÓN ESTEQUIOMÉTRICA

Es la combustión completa realizada con la cantidad estricta de oxígeno; es decir, el aire empleado en la combustión es el mínimo necesario para contener la cantidad de oxígeno correspondiente a la oxidación completa de todos los componentes del combustible.

La expresión de esta combustión es:



En este caso $0,21 \cdot n = x + (y/4)$, siendo el calor generado es el correspondiente a la combustión completa. La combustión estequiométrica permite definir los parámetros característicos del combustible.

2.1.6 PODER COMBURÍVORO

Cantidad de aire seco, medida en condiciones normales ($T_a = 0^\circ\text{C}$ y $P=1 \text{ atm}$), mínima necesaria para la combustión completa y estequiométrica de la unidad de combustible, unidades habituales: Nm^3/kg combustible, Nm^3/Nm^3 combustible. Es un parámetro característico únicamente de la composición del combustible y puede tabularse con facilidad.

2.1.7 PODER FUMÍGENO

Es la cantidad de productos de la combustión (Nm^3) que se producen en la combustión estequiométrica de la unidad de combustible. En función de considerar o no el vapor de agua existente en los productos de la combustión, se tienen Poderes fumígenos húmedo y seco, respectivamente.

2.1.8 COEFICIENTE DE EXCESO DE AIRE

La mayor parte de las combustiones no transcurren en estas condiciones ideales (completa y estequiometría), el principal aspecto a considerar será la posibilidad de que la combustión transcurra con exceso o defecto de aire, para caracterizar la proporción de oxígeno se define el parámetro “coeficiente de exceso de aire. Bailey, A. E. (2020).

$n = \text{volumen aire por unidad de combustible} / \text{Poder comburívoro}$

$n = 1$: Combustión Estequiométrica

$n < 1$: Defecto de aire, se dice que la mezcla es rica

$n > 1$: Exceso de aire, se dice que la mezcla es pobre

Así la combustión puede ser clasificada en:

Combustión con defecto de aire

La cantidad de aire utilizada no contiene el oxígeno necesario para oxidar completamente a los componentes del combustible.



Además de los productos normales de la combustión, Dióxido de carbono (CO₂) y Agua (H₂O), se producen inquemados como el Monóxido de carbono (CO) e Hidrógeno (H₂); en algunos casos con mucho defecto de aire puede haber incluso carbono y combustible sin quemar, en los humos.

2.1.9 PODER CALORÍFICO INFERIOR

Calor que se desarrolla en la combustión completa, con agua está en forma de vapor. En este caso una parte del calor generado en las oxidaciones se utiliza para evaporar el agua, por tanto, esta parte del calor no se aprovecha.

2.1.10 PODER CALORÍFICO SUPERIOR

En los productos de la combustión el agua aparece en forma líquida, por lo que se aprovecha todo el calor de oxidación de los componentes del combustible. En lo común el agua se evacua en los humos en fase vapor, por lo que el poder calorífico más comúnmente utilizado es el inferior.

2.1.11 RENDIMIENTO DE LA COMBUSTIÓN

El calor que puede obtenerse en una combustión es el correspondiente al poder calorífico del combustible (PCI ó PCS), habitualmente referido al PCI. Al realizar la combustión, una parte del calor producido se pierde, asociado a los productos de la combustión; estas pérdidas se pueden agrupar en dos tipos.

-PÉRDIDAS POR INQUEMADOS

Son los productos de la combustión que no han sido totalmente oxidados. Únicamente se presentan en el caso de combustiones incompletas, siendo más altas cuanto mayor sea la cantidad de inquemados.

-ENTALPÍAS DE LOS PRODUCTOS DE COMBUSTIÓN

Corresponde al calor utilizado en calentar los humos hasta la temperatura a la cual escapan por la chimenea, ya que a partir de ese punto el calor que llevan no se recupera.

2.2 COMBUSTIÓN DE HIDROCARBUROS

El proceso de combustión relaciona directamente a la mezcla de un combustible y un agente oxidante o reductor denominado comburente, generalmente esta reacción química se da entre un hidrocarburo líquido o gaseoso en presencia de aire.

Tabla 1

Caracterización de componentes de gases de combustión

Composición de los gases de combustión al 30% de aceite acido de pescado con 70% de petróleo industrial N° 500 medidos con analizador de gases					
%CO ₂	%CO	%N ₂	%H ₂ O	%SO _x	%Cenizas

Fuente. Elaboración propia

2.2.1 GENERADOR DE VAPOR O CALDERO

Un generador de vapor o caldero es una maquina térmica que produce vapor a una presión superior a la atmosférica mediante el suministro de un combustible y una cantidad de aire que se mezclan siendo atomizados y quemados mediante un quemador.

2.2.2 CÁMARA DE COMBUSTIÓN

Es el recinto que albergará y desarrollará el proceso de combustión dentro del caldero.

Figura 2

Cámara de combustión



Nota. *Extraído de la página <https://www.attsu.com/es/productos/calderas-de-vapor/combustible-liquido-y-gaseoso/modelo-hh.html>*

2.2.3 EL PETRÓLEO INDUSTRIAL N° 500

También conocido como petróleo industrial 500 es un combustible que consiste en una mezcla de hidrocarburos pesados, libre de agua, de ácidos inorgánicos compuestos alcalinos y de cantidades excesivas de contaminantes bajo la forma de partículas en suspensión que se utilizan en quemadores comerciales e industriales mediante pre calentadores. La norma técnica peruana (NTP 321.002-INDECOPI 2014), establece los límites y los métodos de ensayo requeridos para el control de calidad a ser utilizados.

PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS

Tabla 2

Propiedades fisicoquímicas del Petróleo industrial N° 500

Propiedades fisicoquímicas	Propiedades
Apariencia, color, olor	Líquido viscoso, color marrón oscuro a negro.
Gravedad específica a 15.6/15.6°C	0.96-0.99 aproximadamente
Viscosidad cinemática a 50°C , cSt.	641-1060
Límites de inflamabilidad, % vol. en aire	1 a 5 aproximadamente
Punto de auto ignición, °C	407 aproximadamente
Solubilidad en agua	Insignificante

Fuente. Petroperú S.A

- PARAFÍNICOS

Sus compuestos principales son naftenos e hidrocarburos saturados de bajo peso molecular lo que permite que sean crudos muy fluidos; tienen una densidad alrededor de 0.85 Kg/L y están por encima de los 31°API. Son los crudos más preferidos comercialmente y de mayor precio, por su facilidad de ser procesados y por la calidad de los productos obtenidos. Estos crudos producen mayores porcentajes de parafinas, naftas (solventes y gasolinas) y bases de aceites lubricantes que otros crudos.

- NAFTENICOS

Sus compuestos principales son naftenos e hidrocarburos aromáticos; tienen un mayor peso molecular que los compuestos parafínicos y una densidad alrededor de 0.95 Kg/L. Están entre los 10 y los 22°API, siendo muy viscosos y de coloración oscura. Generan gran cantidad de residuos en los procesos de destilación, principalmente asfaltos.

- MIXTOS

Están formados por todas las clases de hidrocarburos: parafinas, naftenos, hidrocarburos saturados, insaturados y aromáticos, entre otros, encontrándose densidades alrededor de 0.9 Kg/L y gravedades API entre 22° y los 31°.

- DULCE

Su contenido de azufre es menor de 0.5%, por la cual requiere menor inversión en su procesamiento de refinación para producir gasolina.

- AGRIO

Su contenido de azufre es mayor a 1%, necesitando mayor inversión en su procesamiento para retirar este contaminante.

Los crudos también pueden ser clasificados por su densidad API, la cual es una medición de densidad metálica desarrollada por error en la industria del petróleo con base en la densidad Baumé.

2.3 ATOMIZADO DE COMBUSTIBLE RESIDUAL

La atomización consiste fundamentalmente en dividir cada cm^3 de combustible líquido en alrededor de 7 millones de gotitas del tamaño mínimo posible (Ley de Stokes). Si la combustión es perfecta, las pequeñas gotas nebulizadas presentarán la máxima superficie de exposición a la radiación de la llama dentro del hogar y se vaporizarán antes de disociarse; se facilitará el encendido y se favorecerá la cinética de la reacción de combustión, permitiendo que aire impulsado por el ventilador y determinado por el difusor formen la llama que resulte más conveniente para la cámara o reactor de combustión.

Si la atomización es imperfecta o defectuosa, la disociación o craqueo se efectuará en fase líquida en una mayor proporción, determinando partículas de coque de gran tamaño que difícilmente podrán completar su combustión en el entorno de la llama, convirtiéndose total o parcialmente en hollinamiento de tubos y humo en la chimenea.

Figura 3

Atomización de petróleo industrial



Nota. *Manual de combustión, Castillo Neira, P (2013)*

2.3.1 ENERGÍA Y TIPO DE ATOMIZACIÓN

La atomización es un trabajo y para realizarlo se requiere de una determinada forma de energía que define el tipo de atomizador empleado: El tipo más simple de atomizador consiste en utilizar la presión del propio combustible, forzándolo a pasar a través de un orificio, lo que constituye una tobera de atomización mecánica. Usando la energía contenida en vapor o aire comprimido para romper el combustible en gotitas o droplets, se dispone de un atomizador por fluido Auxiliar.

La combinación de estos dos tipos de atomizadores, determinan el tipo denominado de atomización mecánica asistida por fluido auxiliar, cuando prevalece la presión del combustible. La atomización mecánica con pequeños diámetros de toberas se utiliza principalmente para combustibles limpios; para petróleos residuales o combustibles líquidos sucios, solamente con quemadores grandes con mayores flujos y diámetros mayores. Para este tipo de combustibles, para evitar el ensuciamiento de la boquilla, se inventó el atomizador rotativo, en el cual la energía centrífuga producida por un cono o taza girando a grandes velocidades estira el combustible en las paredes hasta pulverizarlo en finas gotas en el extremo, con el auxilio de aire primario de un ventilador.

2.3.2 EVALUACIÓN DE ATOMIZADORES COMERCIALES PARA PETRÓLEO RESIDUALES

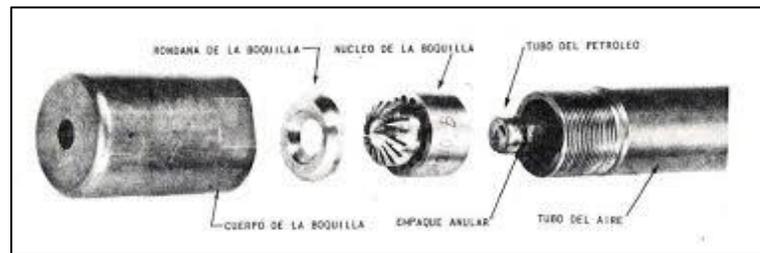
Resulta difícil entender las razones por las cuales hemos comprobado que solamente un 15-20 % de quemadores industriales atomizan correctamente el combustible y solamente podemos explicar esta realidad por el hecho de que, a los proveedores de maquinarias, equipos y servicios industriales, los problemas que se derivan de la atomización imperfecta y consecuente combustión incompleta, los benefician económicamente, porque ocasionan múltiples problemas que administran convenientemente. Como nosotros no vendemos equipo y la ética es el primer paso de la ingeniería, desnudamos esta realidad y les proporcionamos la posibilidad de conseguir interesantes niveles de optimización de costos energéticos, consiguiendo la atomización perfecta con muy poca inversión; solamente tenemos que utilizar los equipos adecuados, Castillo Neira (2013)

En el caso de calderos pirotubulares es donde se presenta una grave deficiencia en la mayoría de plantas industriales, causada principalmente por un grave problema de selección de tecnología adecuada: Como se ha mencionado, existen 3 tipos de atomizadores: mecánico, vapor/aire (fluido pulverizador) y rotativos. La atomización mecánica no resulta recomendable para petróleo residual, por la pequeña abertura de las boquillas para flujos limitados y los atomizadores resultan muy afectados por la abrasividad de las cenizas, trabajando correctamente muy poco tiempo, hasta que varía la uniformidad del cono.

El tipo más recomendable resulta ser entonces el atomizador que utiliza como energía de atomización la aportada por el fluido pulverizador, resultando más favorable el vapor que el aire comprimido; entre los más difundidos encontramos el de Cleaver Brooks que trabaja satisfactoriamente y el Distral que consideramos el que atomiza mejor.

Figura 4

Atomizador de Petróleo Industrial



Fuente. *Manual de combustión, Castillo Neira, P. (2013)*

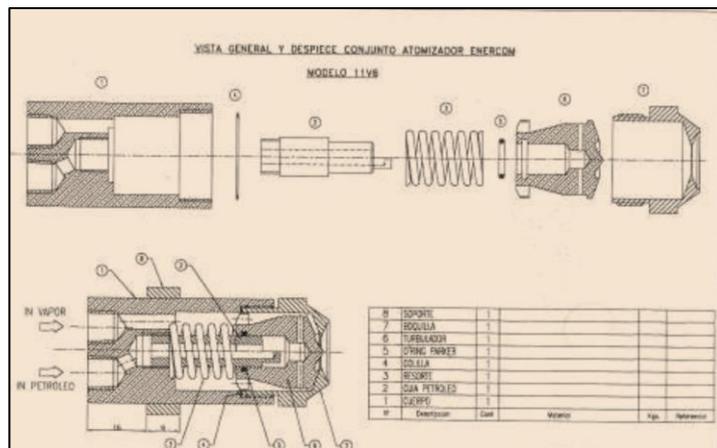
Para calentadores de aceite térmico también se emplea el Atomizador Enercom que tiene una conformación parecida al atomizador de Cleaver Brooks, por lo cual podemos afirmar que resulta perfectamente utilizable en Calderos acuotubulares y pirotubulares.

En la práctica y como la principal causa de la mayoría de casos que encontramos de atomización imperfecta, encontramos la presencia del atomizador monarch, que resulta muy fácil de conseguir y de relativamente bajo precio.

Este atomizador es de atomización mecánica asistida por vapor, es decir, que la energía principal de atomización es la propia presión del combustible; siendo al mismo tiempo la presión la variable que se varía para regular el flujo, este atomizador trabaja correctamente a máxima capacidad, pero al comenzar a modular el caldero y disminuir la presión que corresponde a llama baja y niveles intermedios, la energía de atomización no resultará suficiente y el mayor tamaño de gotas afectará todo el sistema. También en este caso, desarmando el atomizador monarch y analizando su calidad de materiales, criterio de diseño y concepción funcional, nos llegamos a explicar los bajos niveles de eficiencia que encontramos en la mayoría de calderos.

Figura 5

Partes de un atomizador de Petróleo industrial



Fuente. *Manual de combustión, Castillo Neira, P (2013)*

Como puede apreciarse en los quemadores Enercom, Distral y Cleaver Brooks, el vapor que ingresa por la parte externa actúa sobre el petróleo que emerge desde el ducto interior, saliendo en forma conjunta por las ranuras del torbellinador, que dividen el flujo en varios chorros, formando un vórtice que permite dividir el flujo en una nube de gotas microscópicas, las cuales se vaporizan y disocian, poniéndose a disposición del aire como flujo dominante para conformación de la llama adecuada para las características del reactor. Puede apreciarse en estas boquillas que en la parte central sobresale un cono cuyo vértice se orienta hacia el hogar, permitiendo que la amplitud del torbellino resulte relativamente cerrada siendo la presión y el impulso del flujo pulverizador, aire o vapor, el principal aporte de la energía cinética necesaria para la atomización, la presión del vapor (aire) siempre tendrá que ser mayor que la del combustible, variando esta última en función del control del flujo de combustible.

2.4 CARACTERIZACIÓN DE PETRÓLEOS RESIDUALES

2.4.1 PETRÓLEO CRUDO

Etimológicamente, petróleo significa aceite de piedral (pétreo = piedra y óleo = aceite), lo cual define de donde se extrae o donde se encuentra, el también llamado oro negro, debido a su multiplicidad de aplicaciones útiles y valiosas en el mundo moderno.

Los productos de refinación del petróleo que se utilizan como combustibles industriales, son los destilados más pesados y los residuales que salen por el fondo de las columnas de destilación. La combustión de destilados (diésel o gasóleos), tratándose de combustibles

limpios y livianos, resultará fácilmente predecible y relativamente simple su eficiente utilización. En el caso de los residuales, sucios y viscosos, su combustión industrial resulta notablemente más compleja, y en tal sentido, de gran importancia para conseguir eficiencias equivalentes, conocerlos, esto es, caracterizarlos en función de su composición, propiedades fisicoquímicas y contenido de impurezas.

Figura 6

Petróleo industrial 500



Fuente. *Manual de combustión, Castillo Neira, P. (2013)*

2.4.2 ESTADO FÍSICO

Los petróleos residuales podrían considerarse un nivel intermedio entre los combustibles líquidos y los sólidos, debido a que posee en su composición, además de hidrocarburos líquidos, fracciones muy pesadas e impurezas en estado sólido (metales y cenizas).

El análisis comparativo de los combustibles industriales sólidos, líquidos y gaseosos más conocidos incluyendo el contenido de C, H, S y cenizas, nos permite establecer algunas características diferenciales de los residuales respecto a los demás combustibles: Su facilidad para combustionar, expresada por la relación C/H, resulta intermedia entre los gases, destilados y carbones.

Tabla 3

Composición de C, H, S y cenizas de combustibles

Combustible	Análisis % en peso				Poder Calorífico Inferior (*)
	C	H	S	Cen	
Gas Natural	75	25	--	--	21,492
GLP	82,5	17,5	--	--	19,737
Diesel 2	86	13,4	0,1	--	19,378
Residual 4	87	12,5	0,7	0,02	19,224
Residual 5	87	12,0	1,0	0,03	19,098
Residual 6	86	11,5	2,5	0,08	18,640
Carbón Mineral	80	5,5	1,5	13	13,590

Fuente. Manual de combustión, Castillo Neira, P (2013)

2.4.3 COMPOSICIÓN QUÍMICA

Para caracterizar los residuales en función de sus componentes, resulta importante considerar los siguientes:

- COMPUESTOS CARBONOS/ HIDRÓGENOS

Estos son compuestos que poseen características muy diferentes del hidrógeno (gas ligero, incoloro e inodoro) y las del carbono (sólido negro), que combinados en variadas formas y proporciones forman los hidrocarburos. En los residuales se presentarán tales compuestos, aunque en diferentes proporciones, además de los que se produzcan durante los procesos de refinación. Para efectos prácticos, resultará conveniente considerar como factor determinante de la combustibilidad de petróleos residuales su relación C/H, lo cual permitirá caracterizarlos en función de su comportamiento como combustibles industriales en forma rápida y simple, conociendo su composición elemental.

Tabla 4

Relación de carbonos e hidrógenos de combustibles

Componente	C/H	Estado
Metano	3	Gas
Etano	4	Gas
Propano	4.5	Gas/liquido
Butano	4.8	Líquido/gas
Pentano(gasolinas)	5	Líquido
Diésel	5.8	Líquido
Petróleo residual	8	Semisólido
Carbón	>10	Semisólido

Fuente: Teoría de la combustión, Sánchez Naranjo, C (2012)

La relación C/H resulta inversamente proporcional a la facilidad con la que se queman los combustibles en la práctica industrial. Así, el metano tendrá una relación C/H de 3, siendo el hidrocarburo más fácil de quemar, el petróleo crudo normalmente tiene una relación C/H de aprox. 7 y en los residuales, este valor es de aprox. 8, dependiendo de la proporción de compuestos cíclicos presentes en su composición final.

- RESIDUO CARBÓN CONRADSON

El residuo carbonoso conradson proporciona una indicación u orientación valiosa sobre la tendencia del combustible a formar inquemados, esto es, a coquizar. Los índices de conradson elevados dan una indicación significativa sobre la tendencia a la formación de coque de un combustible en los precalentamientos y la posibilidad de que se produzca el ensuciamiento de la boquilla del quemador durante su operación.

Tabla 5

Composición de sedimentos de petróleo industrial 500

Sedimentos	%
Materias solubles en aceite mineral	20.7
Asfaltenos y productos polimerizados y oxidados	3.5
Impurezas sólidas, coque, jabones metálicos, etc	12.5
Carbón libre referido al producto original e incluido en las impurezas	5.6
Productos volátiles solubles	57.7

Fuente. Petroperú, 2009

-INFLAMABILIDAD

El punto de inflamación o inflamabilidad de un combustible líquido proporciona una indicación sobre el valor de la temperatura a la cual el producto, ensayado según una cierta norma, emite suficientes vapores para que pueda inflamarse la mezcla aire-gases provocada por el calentamiento del fluido.

- PODER CALORÍFICO

Representa la cantidad de calor que posee y es capaz de liberar un combustible residual por cada unidad de volumen o masa considerado.

La relación entre ambos es la siguiente: $PCI = PCS - 5,85 (9 \times \% H \times \% \text{ humedad})$ Existen fórmulas empíricas que permiten calcular en forma suficientemente aproximada el PCS a partir

del análisis elemental del combustible referido a base seca, siendo la más conocida la de Dulong:
 $PCS = 80,8 (C) + 344 (H_2 - O_2/S) + 22,2 (S) \text{ kCal/kg.}$

2.5 MARCO CONCEPTUAL

Se presenta a continuación los conceptos más importantes relacionados a las dimensiones de las variables de investigación.

- TUBOS DE HUMOS

Es el conjunto de tuberías por donde circulan los gases de la combustión, están fabricados en acero al carbono y sus especificaciones técnicas van desde la norma ASME, ASTM y ANSI, se caracterizan por un espesor en función a la capacidad de evaporación o superficie de calefacción del caldero.

- PETRÓLEO INDUSTRIAL N° 500

Mezcla compleja de hidrocarburos pesados de características viscosa a temperatura de ambiente, cuya composición química está dentro de, intervalo $C_{12} - C_{50}$. Es ampliamente utilizado como combustible por su alto contenido energético, se usa actualmente en la industria pesquera, conservera, agroindustrial, papelera, azucarero y refinadoras de aceites.

- ACEITE ÁCIDO RESIDUAL DE PESCADO

Se obtiene recuperándose mediante equipos de procesos fisicoquímicos para su separación, contiene un valor energético aprovechable como combustible.

- PODER CALORÍFICO INFERIOR

Energía liberada al producirse una reacción química de oxidación.

- ÍNDICE DE BACHARACH

Método para determinar los inquemados sólidos en un proceso de combustión, se basa en el ennegrecimiento de un papel de filtro al paso de una corriente de gases de combustión, extraída mediante una bomba manual, comparando el color del filtro con una escala de intensidades de color que varía desde 0 que es blanco hasta el 9, que es negro.

- AIRE ESTEQUIOMÉTRICO DE COMBUSTIÓN

Es la cantidad exacta de aire necesario para oxidar por completo a un combustible determinado, es un valor teórico y sobre ella se adopta un incremento adicional de aire para completar la reacción química de oxidación.

- EXCESO DE AIRE DE COMBUSTIÓN

Es la cantidad de aire por encima de la estequiometría que se agrega a un sistema de combustión para garantizar la oxidación total del combustible, su dosificación está en función al tipo de combustible (líquidos, sólidos o gaseosos), y se comporta como un desarrollador de la llama de combustión.

- TEMPERATURA DE LLAMA ADIABÁTICA

Es la máxima temperatura teórica alcanzada en un sistema de combustión sin que esta realice intercambio de energía con su entorno.

- TEMPERATURA DE CÁMARA

Es la temperatura promedio a la cual se encuentran los gases de combustión desarrollados dentro del recinto de combustión, y es inferior a la temperatura de llama adiabática aproximadamente el 70% de la temperatura de llama adiabática.

CAPÍTULO III
MARCO METODOLÓGICO

3.1 HIPÓTESIS CENTRAL DE INVESTIGACIÓN

La proporción de mezcla de aceite ácido residual de pescado mezclado con petróleo industrial N° 500 influye en el poder calorífico de la mezcla, composición de gases y la eficiencia de combustión para su aplicación en calderos industriales.

3.2 VARIABLES E INDICADORES DE LA INVESTIGACIÓN

VARIABLE INDEPENDIENTE

-Proporción de mezcla

VARIABLE DEPENDIENTE

-Poder calorífico

3.2.1 DEFINICIÓN CONCEPTUAL DE LAS VARIABLES

Aceite ácido residual: Subproducto del procesamiento de harina de pescado cuyas características presentan propiedades combustibles.

Petróleo industrial N° 500: Mezcla compleja de hidrocarburos pesados de características viscosa a temperatura de ambiente, cuya composición química está dentro de, intervalo C₁₂ - C₅₀.

Poder calorífico: Es la cantidad de energía que la unidad de masa o unidad de volumen de un material puede desprender al producirse una reacción química de oxidación.

3.3 MÉTODOS DE LA INVESTIGACIÓN

El tipo de investigación es del tipo experimental pura o básica ya que se manipulará la variable independiente (proporción de mezcla), para medir los efectos sobre la variable dependiente (poder calorífico), al interpretar, someter a discusión y análisis los resultados de cada variable de investigación.

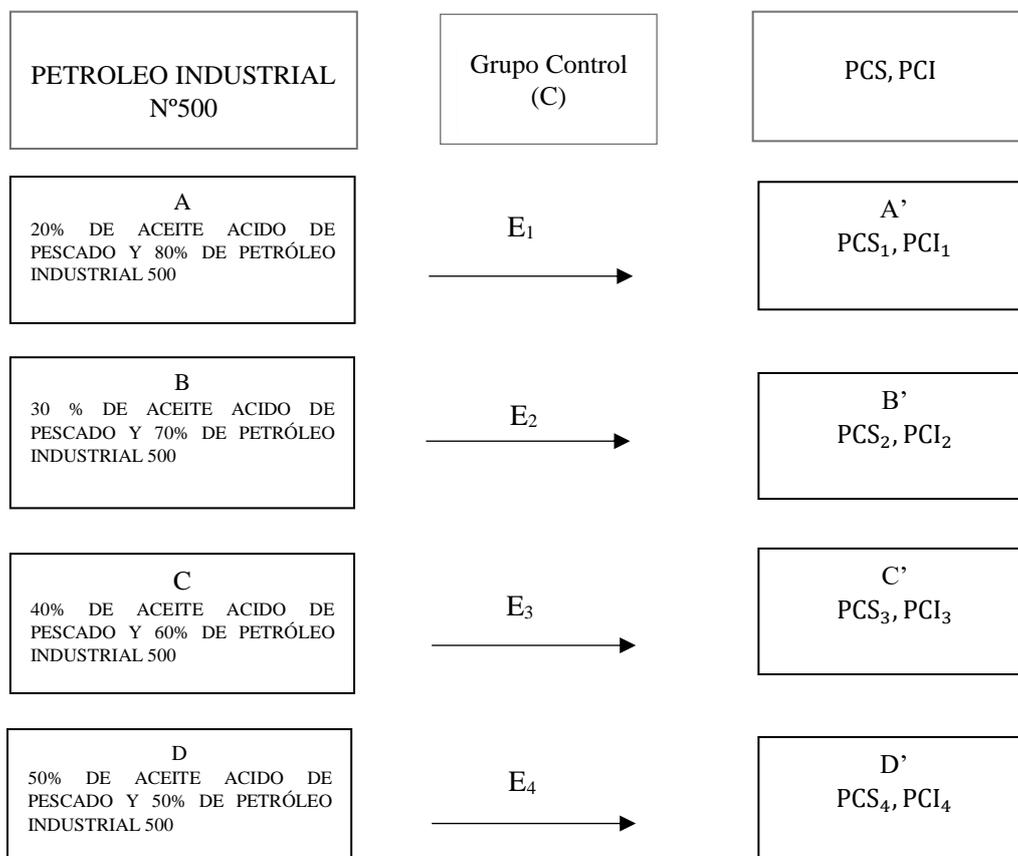
3.4 DISEÑO O ESQUEMA DE LA INVESTIGACIÓN

La investigación se compone de dos etapas, la primera ejecutada en el laboratorio de fisicoquímica y la otra en las instalaciones de la empresa Tecnología de alimentos S.A, por lo cual la investigación sostiene su naturaleza experimental y por la consecuencia de los resultados la parte de investigación aplicada. Según Tresierra ,Aguilar,E. (2015) en su libro Metodología de la Investigación Científica”, sostiene que el diseño de investigación experimental con pre test y de estímulo creciente se utiliza para encontrar una relación de

efecto basado en el aumento progresivo de la magnitud de la variable independiente , con el cual se determina la experimentación , ya que todo resultado del estímulo se medirá en la variable dependiente y en efecto es verdadero debido a que se aumentaran las dosis de aceite a criterio en relación con el petróleo industrial 500, fijando como grupo de control a una muestra de aceite y petróleo industrial 500 en su estado puro, para que a partir de los incrementos porcentuales de mezcla se obtengan los indicadores de interés según como se presupone en la hipótesis de la investigación , la cual busca una relación entre la proporción de mezcla y su poder calorífico superior que se obtendrá a partir de la fijación de otras variables como la presión de oxígeno, la cantidad de muestra ,el aporte de calor del alambre de ignición cuando se someta a combustión en la bomba calorimétrica .De esta manera se conocerá cual es la relación de mezcla que libera mayor cantidad de energía por unidad de masa a la cual nos referimos como Poder calorífico, a partir del cual se utilizara en el proceso de combustión de un caldero pirotubular de 900 BHP con el que se realizará la prueba de campo, siendo este el objetivo de su aplicación para resolver un problema del tipo técnico industrial y que se categoriza en esta etapa como una investigación de finalidad aplicada.

3.4.1 DISEÑO PARA PROCESO EXPERIMENTAL- LABORATORIO

Gráfica 1



Fuente. Elaboración propia

Donde:

A, B, C y D. Serán cinco muestras de análisis en las proporciones descritas, según el Pretest realizado para su aplicación en el laboratorio de fisicoquímica.

C, E1, E2, E3, E4 y E5: el primero será el grupo control y el resto el estímulo creciente.

C : Grupo control

PCS : Poder calorífico superior

PCI : Poder calorífico inferior

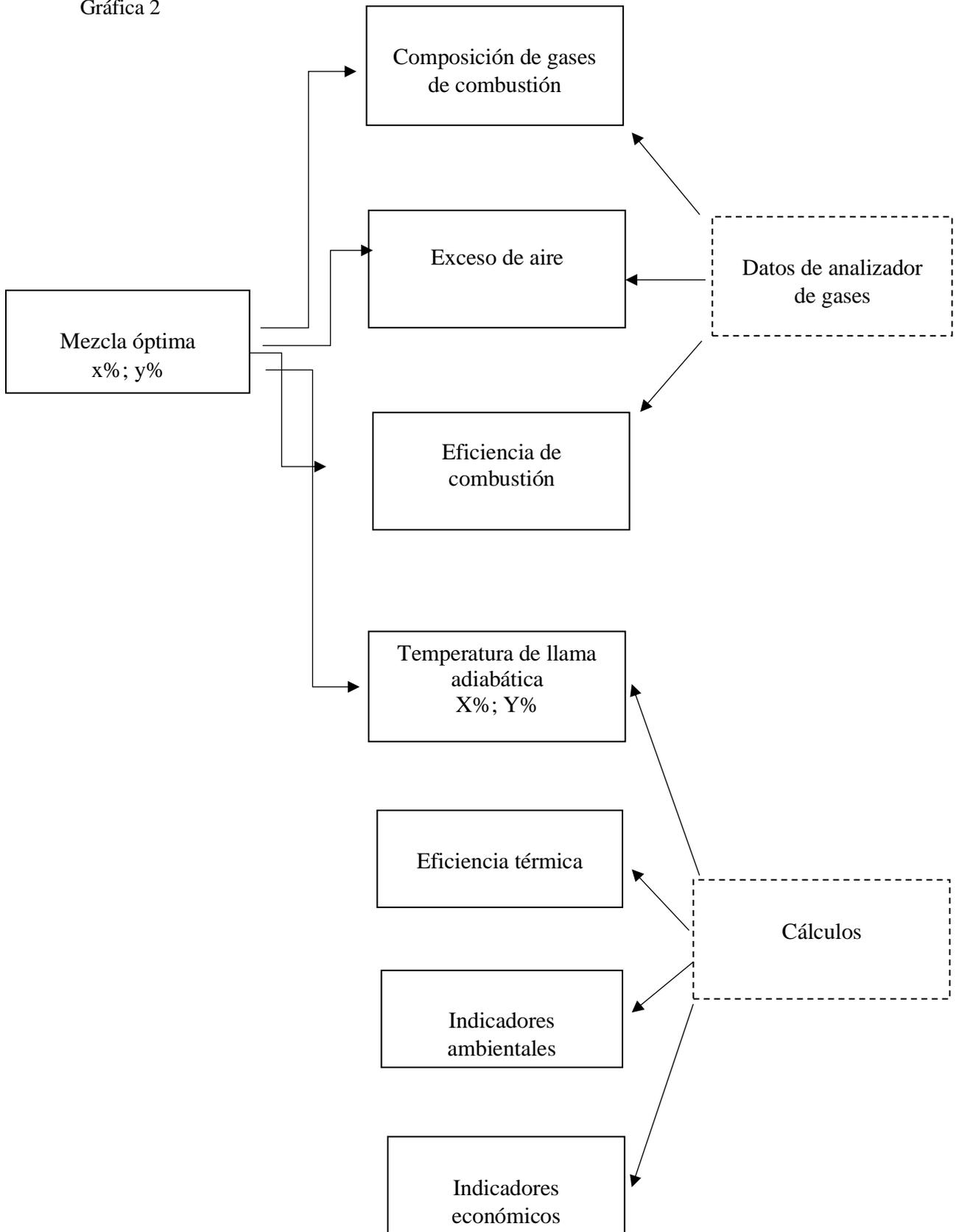
A, B, C y D: Son los experimentos característicos, según el Pretest realizado.

- (PCS₀; PCI₀) : Obtención del poder calorífico superior e inferior para las muestras en su estado puro (Grupo testigo o control).
 - (PCS₁; PCI₁) : Obtención del poder calorífico superior e inferior para la muestra al 20% de aceite acido residual y 80 % de petróleo industrial.
 - (PCS₂; PCI₂) : Obtención del poder calorífico superior e inferior para la muestra al 30% de aceite acido residual y 70 % de petróleo industrial.
 - (PCS₃; PCI₃) : Obtención del poder calorífico superior e inferior para la muestra al 40% de aceite acido residual y 60 % de petróleo industrial.
 - (PCS₄; PCI₄) : Obtención del poder calorífico superior e inferior para la muestra al 50% de aceite acido residual y 50 % de petróleo industrial.
- DISEÑO DE PARTE APLICADA-COMBUSTIÓN EN CALDERO 900 BHP

En la etapa de aplicación se presenta el siguiente esquema de procedimientos identificando el método y la técnica que se utilizara en la aplicación de la mezcla para su combustión en un caldero de 900 BHP, en esta etapa se señalan algunas variables de interés desde el aspecto de la combustión y operatividad del caldero.

3.4.2 DISEÑO PARA EL PROCESO DE APLICACIÓN DE CAMPO

Gráfica 2



Fuente: Elaboración propia

3.5 POBLACIÓN Y MUESTRA

POBLACION

Está conformada por el aceite ácido residual procesado en plantas pesqueras de Chimbote.

MUESTRA

Está conformada por el aceite ácido residual proveída de la industria pesquera.

3.6 ACTIVIDADES DEL PROCESO INVESTIGATIVO

Como etapa preliminar se establecerán dos etapas experimentales diferenciadas, una relacionada al estudio fisicoquímico de las mezclas desarrollado en laboratorio y la etapa de aplicación de campo mediante un sistema de combustión de caldero pirotubular de 900 BHP.

3.6.1 ENSAYOS PARA DETERMINAR EL PODER CALORÍFICO DE LAS MEZCLAS

El ensayo se llevó a cabo en el laboratorio de Fisicoquímica de la Universidad Nacional del Santa.

PROCEDIMIENTO 1

Se procede a calibrar o resetear la balanza analítica.

PROCEDIMIENTO 2

Se separa un poco de aceite ácido residual y se coloca en un recipiente para observar su color y tomar registro de su aspecto y color

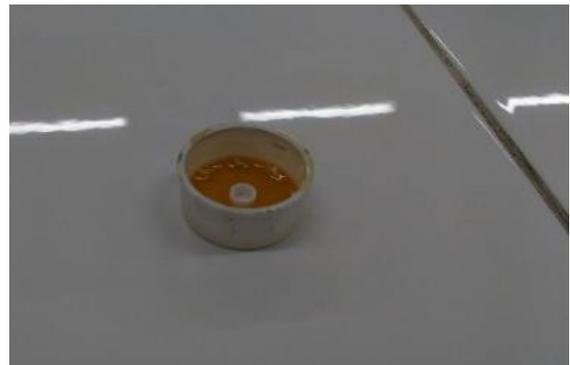


Figura 7

Aceite ácido residual de pescado



Figura 8

Pesado de muestra de aceite ácido.

Se dispone de una cantidad de aceite de 1 gramo que se obtiene de la medida de una balanza analítica para luego usarse en el crisol del reactor de la bomba calorimétrica.

PROCEDIMIENTO 3

Se coloca el alambre de ignición alrededor de los terminales haciendo que el hilo conductor roce ligeramente a la muestra de aceite, se asegura el alambre y se procede a cerrar herméticamente el calorímetro.

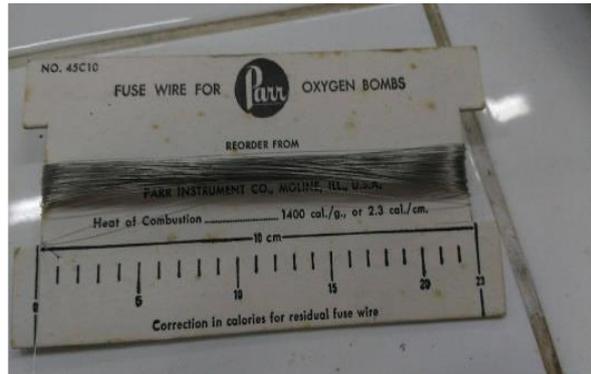


Figura 9

Alambre de ignición de cobre revestido con aluminio de 1400 cal/gr

PROCEDIMIENTO 4



Se coloca el alambre de ignición alrededor de los terminales haciendo que el hilo conductor roce ligeramente a la muestra de aceite, se asegura el alambre y se procede a cerrar herméticamente el calorímetro.

Figura 10

Inserción de cazoleta en reactor

PROCEDIMIENTO 5

Se llena el recipiente con cantidad de 1470 ml de agua, asegurando que el nivel de agua quede por encima de la tapa, luego se procede a cerrar herméticamente y se ingresa oxígeno a la presión de 15 psi.



Figura 11

Llenado de agua mediante probeta graduada

PROCEDIMIENTO 06



Colocación del reactor en la bandeja con agua, se considera un volumen de agua referencial que servirá para absorber el calor que proviene del interior del reactor cuyo perfil de temperatura estará en función al tiempo.

Figura 12

Verificación de llenado de agua

PROCEDIMIENTO 7



Figura 13

Balón de oxígeno

El balón de oxígeno cuenta con su sistema de regulación y medición de presión para el cual se dispone a regular la presión a 15 Psig.

PROCEDIMIENTO 8

Se hacen las conexiones de la manguera de oxígeno, la fuente de alimentación donde se regula la tensión y la corriente que se necesita para suministrar corriente al alambre de ignición.



Figura 14

Apertura de balón de oxígeno regulando la presión

PROCEDIMIENTO 9

Se verifica que los terminales y accesorios del reactor estén instalados adecuadamente y con el nivel de agua óptimo, por lo que se procede a asegurar la posición del reactor.



Figura 15

Instalación de cables terminales positivo y negativo para conducción de corriente

PROCEDIMIENTO 10



Se coloca el cuerpo del reactor sumergido el agua y se coloca un agitador de paleta con la que se agitará de manera lenta con la finalidad de homogenizar la temperatura dentro del recipiente. Luego se coloca un termómetro para medir la temperatura inicial del agua, el valor inicial de temperatura registrado fue de 25.15 °C.

Figura 16

Instalación del calorímetro

3.6.2 PRUEBAS DE MISCIBILIDAD DE MEZCLAS DE ACEITE Y P.I.500

PROCEDIMIENTO 10



Se toma la cinta de pH sobre la muestra de aceite haciendo contacto durante 20 segundos a fin de obtener un valor de referencia del grado de acidez o rancidez del aceite, ya que este parámetro indica el grado de degradación del aceite o su envejecimiento que puede ser un factor determinante cuando este se precaliente con el petróleo industrial 500.

Figura 17

Prueba de acidez

PROCEDIMIENTO 11

El análisis fisicoquímico de las muestras se realizan basado en su procedencia u origen, el aceite de pescado es contiene en su cadena moléculas de oxígeno sin embargo el petróleo industrial 500 tiene tendencia a ganar humedad desde que se dispone su almacenamiento hasta su punto de entrega en ese sentido la humedad es un factor negativo para el hidrocarburo y puede verse afectado su poder calorífico cuando participe en la mezcla con el aceite, por ello es determinante establecer su grado de miscibilidad y estabilidad de mezcla.



Figura 18

Prueba de miscibilidad



Figura 19

Muestras en reposo

El análisis fisicoquímico de las muestras se realizan basado en su procedencia u origen, el aceite ácido de pescado contiene en su cadena moléculas de oxígeno sin embargo el petróleo industrial 500 tiene tendencia a ganar humedad desde que se dispone su almacenamiento hasta su punto de entrega en ese sentido la humedad es un factor negativo para el hidrocarburo y puede verse afectado su poder calorífico cuando participe en la mezcla con el aceite, por ello es determinante establecer su grado de miscibilidad

3.6.3 METODOLOGÍA PARA DETERMINAR EL PODER CALORÍFICO DE MEZCLAS

La metodología consiste en quemar el combustible al interior de un reactor donde se encuentra una cacerolita que contiene la mezcla combustible en medio de una atmosfera de oxígeno a 15 psi , en la superficie de la mezcla hace contacto el alambre de ignición el cual sirve de ignitor o fusible por el cual circula corriente eléctrica suministrada por una fuente de alimentación instalada al exterior del calorímetro , luego de cerrar herméticamente el calorímetro , se procede a activar el paso de corriente eléctrica que origina la combustión al interior del reactor, en la parte externa del recipiente donde se sumergió el reactor en agua se coloca un termómetro industrial con el cual se registra la temperatura que alcanza a medida que y transcurre el tiempo, para el caso se debe esperar unos minutos hasta que la temperatura se estabilice o hasta cuando este ha alcanzado su valor máximo en el termómetro , para ello se registra también el tiempo que tomo en el calentamiento.

Se grafica la relación del tiempo y la temperatura alcanzada en cada experimento en base a la proporción de mezcla que se está utilizando, con la finalidad de conseguir la tendencia del calentamiento del agua que circunda al reactor en el tiempo que este proceso muestra.

3.7 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN

Se utilizó la siguiente técnica e instrumentación de recolección de datos.

- LA OBSERVACIÓN

Se examinó la literatura teórica y los antecedentes de investigaciones referente al aceite de pescado y sus derivados como el aceite ácido residual y su potencial energético liberada por unidad de masa, sostenida en la teoría de combustión y la Norma Técnica Peruana N.T.P 350.300.2008 que se aplica para determinar la eficiencia térmica y la NTP.351.301.2009 referido al estándar de eficiencia térmica combustible /vapor y etiquetado

Se registrarán los datos.

Se analizará e interpretará los datos

Se elaborarán conclusiones

3.8 PROCEDIMIENTO PARA LA RECOLECCIÓN DE DATOS

Se procedió a desarrollar la etapa de experimentación de combustión de la mezcla.

Se prepara la mezcla de aceite ácido en el porcentaje correspondiente con la cantidad porcentual de petróleo industrial N° 500.

- Se procede a revisar la tubería de alimentación de combustible y los accesorios.
- Regulación de exceso de aire al porcentaje a experimental

- Con el caldero en el nivel de agua adecuado, se procede a dar inicio el proceso de combustión con la proporción de mezcla a analizar.
- Se espera 5 minutos para uniformizar la distribución de los gases en la cámara de combustión, los tubos de gases.
- Se procede a tomar las temperaturas en los puntos dispuestos del cuerpo del caldero.
- Se procede a tomar mediciones con el analizador de gases
- Se registran los datos medidos.
- Se apaga el quemador y se pone en reposo el caldero pirotubular

3.8.1 SISTEMA QUEMADOR Y CALDERO

Para la parte experimental se hará uso de un quemador y un caldero provisto de un sistema auxiliar comprendido por el sistema de bombero y tubería, esta a su vez compuesta por filtros y válvulas, además de un precalentado de combustible que mantendrá la temperatura de la mezcla a 115°C, para garantizar la viscosidad adecuada la cual permita el punto de fluidez al combustible hasta su atomización en el quemador.

- CALDERO PIROTUBULAR DE 900 BHP

Se hará uso de un caldero pirotubular de 900 BHP, que consume en forma normal petróleo industrial N° 500, a razón de 150 Gal/h, cuenta con un sistema de precalentamiento de combustible hasta 115°C, cuya temperatura de agua de alimentación es de 85°C, proveniente de un tanque recuperador de condensador donde se mezclan el retorno de condensado y agua tratada del tanque diario de alimentación.

- TUBERÍA

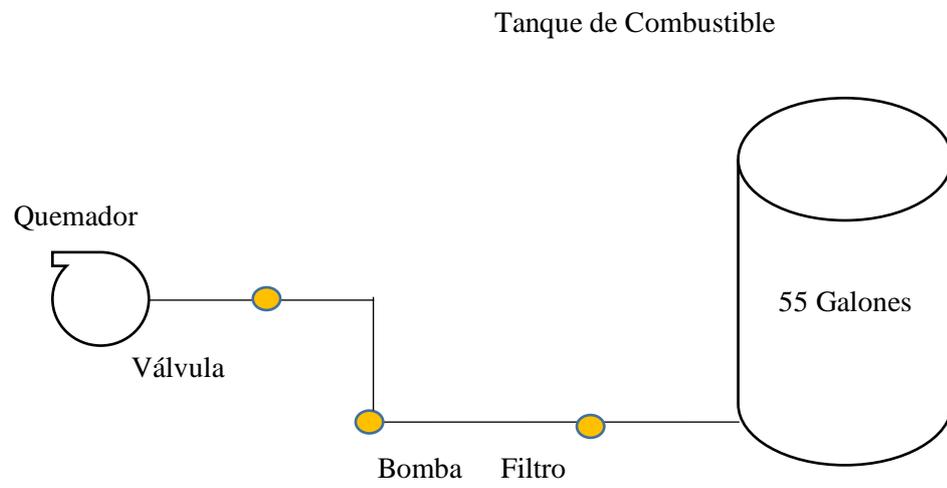
Para el transporte de combustible desde el tanque diario donde se realizarán las mezclas, se han dispuestos 5 m de recorrido de tubería de PBC de 1 1/2, donde se instala un filtro de combustible, una válvula check, un manómetro y sensor de temperatura.

3.8.2 TANQUE DE ALMACENAMIENTO PARA MEZCLA DE COMBUSTIBLE

Para llevar a cabo la parte experimental se dispondrá de 1 recipiente cilíndrico conformado por un cilindro adaptado con capacidad para 55 galones, instalados con tuberías de acero de 1.1/2 Pulgada, con accesorios entre codos y una válvula check, además de un filtro.

Figura 20

Sistema de instalación de tanque y tubería para suministro



Fuente: *Elaboración propia*

3.8.3 PROPORCIONES DE MEZCLAS A COMBUSTIONAR

Tabla 6

Relación de porcentajes de mezcla de combustibles

Aceite ácido de pescado	Porcentaje
30 %	70%

Fuente. Elaboración propia

- PRIMER ENSAYO EXPERIMENTAL

Se prepara 30% de aceite residual de pescado cuyas propiedades han sido determinadas en el laboratorio.

Se sabe que el consumo del petróleo industrial 500 es de 150 galones por hora y para efecto de la experimentación se considera el tiempo de 30 minutos ya que la unidad toma entre 5 min para calentar y llegar a sus parámetros operativos quedando 23 minutos para realizar la prueba de medición de combustión por lo que se justifica solo el uso de 55 galones de mezcla de combustible.

El costo de preparar la mezcla tuvo un valor aproximado de 300 soles considerando que el aceite que se ha recuperado del proceso no tiene valor económico en su aplicación para este caso de estudio.

Tabla 7

Proporciones de combustible para mezcla

Proporciones de mezcla		Cantidad de galones de combustible		
Aceite ácido de pescado	Porcentaje	Galón de aceite ácido de pescado	Galones de petróleo	Total, en Mezcla Galones
30 %	70 %	16.5	38.5	55

Fuente: Elaboración propia

3.8.4 INSTRUMENTACIÓN Y MEDICIONES

Para la experimentación se hará uso de termocuplas tipo K u otros sensores de medición, además de:

- Pirómetros
- Anemómetro
- Sensores de temperatura (5 termocuplas tipo K)
- Analizador de gases

3.9 TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE LOS DATOS

La información se redactó mediante herramientas de Microsoft word y se analizó los resultados a través de Microsoft excel, utilizando para el tratamiento de datos la estadística para la naturaleza del diseño experimental, se realizarán gráficos y curvas comparativas relacionada la interacción de las variables mediante.

- Diagrama de barras
- Diagrama de dispersión
- Diagramas de pay

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1 ESTUDIO CALORIMÉTRICO DE ACEITE RESIDUAL DE PESCADO Y PETRÓLEO INDUSTRIAL 500

Balance térmico en la bomba calorimétrica

$$\text{Calor absorbido por el agua: } (m_{\text{H}_2\text{O}})(C_{\text{H}_2\text{O}})(\Delta T) \quad (01)$$

$$\text{Calor absorbido por bomba: } (m_{\text{Bom}})(C_{\text{Bom}})(\Delta T) \quad (02)$$

Sumando las ecuaciones (1) y (2)

$$Q_{\text{Abs.H}_2\text{O}} + Q_{\text{Abs.Bom}} = [(m_{\text{H}_2\text{O}})(C_{\text{H}_2\text{O}}) + (m_{\text{Bom}})(C_{\text{Bom}})]\Delta T \quad (03)$$

Se establece entonces una constante a partir de la suma de ambos calores absorbidos, denominándose en adelante: φ

$$\varphi = (m_{\text{H}_2\text{O}})(C_{\text{H}_2\text{O}}) + (m_{\text{Bom}})(C_{\text{Bom}})$$

$$\varphi = 1,470 \text{ Kg} * 4.18 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} + 1500\text{gr} * 0,12 \frac{\text{Cal}}{\text{g}^\circ\text{C}} * \frac{1\text{kcal}}{1000\text{Cal}} * \frac{4.18 \text{ kJ}}{1\text{k Cal}}$$

$$\varphi = 6,897 \frac{\text{kJ}}{\text{g}^\circ\text{C}} = 1650 \frac{\text{Cal}}{\text{g}^\circ\text{C}}$$

Balance en mezcla combustible y alambre de ignición

$$-\varphi \cdot \Delta T = m_{\text{aceite}} * \Delta U_{\text{aceite}} + m_{\text{alambre}} * \Delta U_{\text{alambre}}$$

Reemplazando se tiene

$$-\left(1650 \frac{\text{Cal}}{\text{g}^\circ\text{C}}\right) * 4.65^\circ\text{C} = 1\text{gr} * \Delta U_{\text{aceite}} + 1.10 \text{ gr} * 1400 \frac{\text{Cal}}{\text{gr}}$$

$$\Delta U_{\text{aceite}} = 9212.5 \frac{\text{Cal}}{\text{g}} = 9212.5 \frac{\text{kCal}}{\text{Kg}}$$

4.1.1 REGISTRO DE TEMPERATURAS EN FUNCIÓN DEL TIEMPO DE CALENTAMIENTO DE AGUA

Tabla 8

Registro de datos para muestra de aceite ácido residual de pescado puro

Variación de temperatura	Nº Lectura	Tiempo (min)	Temperatura(°C)
	1	0	18.40
	2	1	18.45
	3	2	18.49
	4	3	18.55
	5	4	18.55
	6	5	18.65
Calentamiento(x)	7	6	18.75
	8	6.30	19.10
	9	6.45	19.35
	10	6.55	19.40
Transición(y)	11	6.75	19.75
	12	7	21.45
	13	8	22.70
Estabilización (z)	14	9	22.90
	15	10	23
	16	11	23
	17	12	23
	18	13	23
	19	14	23
	20	15	23

Fuente: Elaboración propia

4.1.2 ANÁLISIS DEL CAMBIO DE TEMPERATURA Y TIEMPO DE CALENTAMIENTO

En el proceso de combustión se tiene el perfil de temperatura del calorímetro con la muestra de aceite ácido puro, en esa condición se analizará el perfil característico de temperatura, la zona de transición de calentamiento y la región donde se estabiliza, es decir donde ya no se aprecia el aumento de temperatura que registra en el termómetro.

Etapa de calentamiento : Este proceso se da cuando el calor empieza a atravesar la pared de acero del reactor o cilindro de combustión del calorímetro , la transferencia de calor se da por convección desde la región interna con atmosfera gaseosa producto de la oxidación del aceite junto al oxígeno, para tal efecto se tiene que el calor se dirige por convección hasta la zona de pared interna para luego pasar por conducción a través de la pared del espesor del reactor para luego continuar en proceso de convección hacia el agua donde se encuentra alojado el termómetro para registro de la temperatura.

$$T_{\text{transicion}} = T_{\text{inicio}} + (T_{\text{máxima}} - T_{\text{inicio}}) * 60\%$$

$$T_{\text{Trans}} = 18.40^{\circ}\text{C} + (23^{\circ}\text{C} - 18.40^{\circ}\text{C}) * 0,6$$

$$T_{\text{Trans}} = 21.16^{\circ}\text{C}$$

Observando los valores registrados en el recuadro de temperatura y tiempo, la temperatura que se obtuvo en el cálculo es de 21.16°C, luego se interpola.

6.75	19.75 °C
T	21.16 °C
7	21.45°C

$$\frac{t - 6.75}{7 - 6.75} = \frac{21.16 - 19.75}{21.50 - 19.75}$$

$$t = 6.95 \text{ min}$$

OBTENCIÓN DE TEMPERATURA CORREGIDA

$$\frac{T_{\text{inicial}} - T}{7'} = \frac{T_{\text{ic}} - T_{\text{inicial}}}{y - x}$$

$$T_{\text{ic}} = 18,40 + \frac{(18.40 - 18.75)^{\circ}\text{C}(6.95 - 6)\text{min}}{6\text{min}}$$

$$T_{\text{ic}} = 18.34^{\circ}\text{C}$$

Se obtendrá la temperatura máxima corregida (T máximo) haciendo proporcionalidad para lo cual la Temperatura (T₃) es la que se registra a los 5 min que dura el proceso y Z en el instante a la temperatura máxima, luego:

$$\frac{T_{\text{máx}} - T_3}{6'} = \frac{T_{\text{máxc}} - T_{\text{máx}}}{z - y}$$

En la tabla, se tiene el tiempo (z) se utilizará el tiempo promedio para el cual la temperatura mayor registrada vario. Luego se ubica en z=9 minutos, se reemplaza y se obtiene.

$$\frac{T_{\text{máx}} - T_3}{6'} = \frac{T_{\text{máx}(z)} - T_{\text{máx}}}{z - y}$$

$$T_{\text{máx}(z)} = 23^{\circ}\text{C} + \frac{(23^{\circ}\text{C} - 23)(9' - 6.75')}{6'}$$

$$T_{\text{máxc}} = 23^{\circ}\text{C}$$

además

$$\Delta T = T_{\text{máx}(Z)} - T_{\text{ic}}$$

$$\Delta T = 23^{\circ}\text{C} - 18.34^{\circ}\text{C} = 4.66^{\circ}\text{C}$$

4.1.3 CÁLCULO DEL PODER CALORÍFICO SUPERIOR

$$\text{PCS} = \frac{E * \Delta T - A}{m_c}$$

$$\text{PCS} = \frac{1890 \frac{\text{Cal}}{\text{g}} * 4.66^{\circ}\text{C} - 2,3 \frac{\text{Cal}}{\text{cm}} * 10\text{cm}}{1.0 \text{ g}} = 8784.4 \frac{\text{kcal}}{\text{Kg}}$$

Tomando el valor promedio de ambos valores de poder calorífico superior encontrados se tiene.

$$\text{PCS}_{\text{Prom}} = \frac{9212.5 \frac{\text{kCal}}{\text{Kg}} + 8784.4 \frac{\text{kcal}}{\text{Kg}}}{2} = 8998.45 \frac{\text{kCa}}{\text{Kg}}$$

4.1.4 CÁLCULO DEL PODER CALORÍFICO INFERIOR.

Reemplazándose en la ecuación para obtener el Poder Calórico Inferior del aceite ácido residual puro.

$$\text{PCI} = \text{PCS} - 567(9\text{H} + \text{H}_2\text{O})$$

Datos:

Calor de condensación del agua a 0°C	: 567 kCal/kg
Porcentaje de hidrógeno presente en combustible	: H: 16%
Porcentaje de humedad en el combustible	: H ₂ O (1%)

$$\text{PCI} = 8998.45 - 567(9 * 0.16 + 0.01)$$

$$\text{PCI} = 8176.3 \frac{\text{kCal}}{\text{Kg}}$$

El valor obtenido representa el poder calorífico inferior del aceite puro de pescado, así mismo se procede con la misma metodología para obtener el poder calorífico superior e inferior de las muestras y sus proporciones.

Cuando se determinó el PCS y PCI para las sustancias puras, se consideró el promedio de sus valores obtenidos.

4.2 RESUMEN DE CÁLCULOS DE PODER CALORÍFICOS

Tabla 9

Resumen de valores obtenidos de PCS y PCI para combustibles puros y mezclas.

Poder Calorífico	Aceite residual puro(kcal/kg)	Petróleo residual 500 puro (kcal/kg)	20% Aceite residual y 80% petróleo industrial 500(kcal/kg)	30% Aceite residual y 70% petróleo industrial 500(kcal/kg)	40% Aceite residual y 60% petróleo industrial 500(kcal/kg)	50% Aceite residual y 50% petróleo industrial 500(kcal/kg)
PCS	8998.45	10352	7897	9598	8086	6952
PCI	8176.3	9789.2	7031.35	8732.4	7220.3	6086.3

Fuente: Elaboración propia

De la tabla 11, se observa que el Poder calorífico inferior referido a las mezclas alcanza su valor máximo al 30% de aceite ácido residual mezclado con 70% petróleo Industrial 500, identificándose como la relación de mezcla óptima para combustionar, sin embargo, en las otras relaciones de proporción de mezcla se observa que porcentajes inferiores de aceite reduce su efecto energético y porcentajes superiores de mezclas generan un efecto menor en el poder calorífico. Esta situación indica que existe una proporción de mezcla adecuada siendo importante conocerla para usarse a mayor escala.

4.3 Perfil de calentamiento en bomba calorimétrica para mezclas combustibles

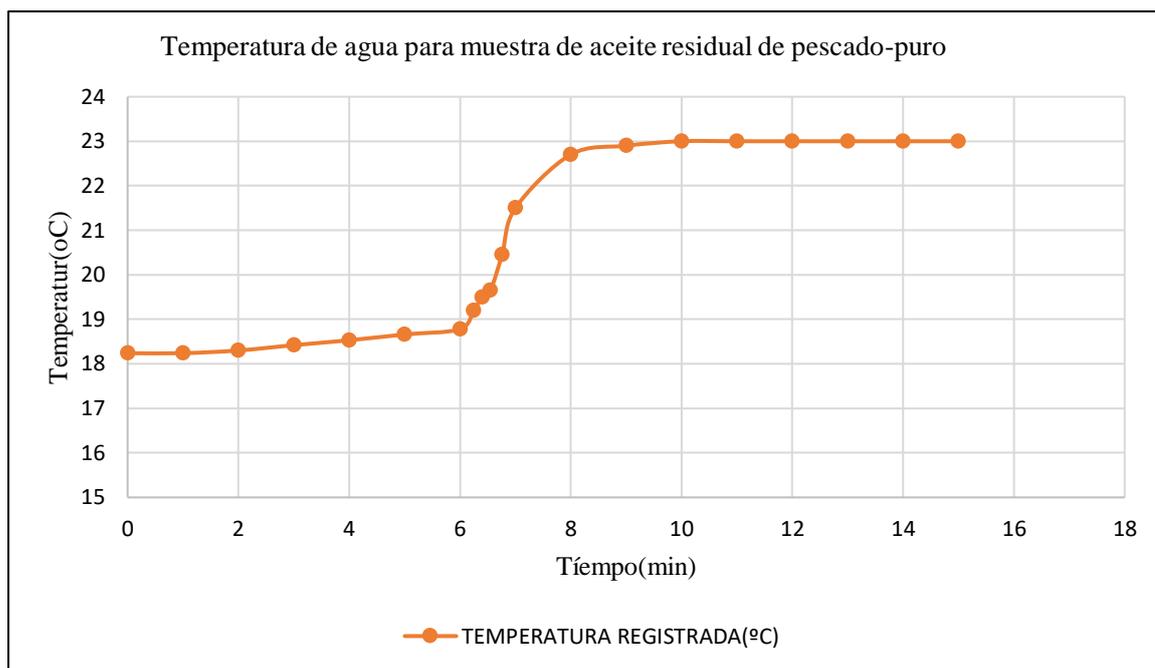


Gráfico 3. Perfil de temperatura para muestra de aceite ácido puro.

De la gráfica 3, se observa que la combustión de aceite ácido residual puro tiene un proceso de transición de temperatura que produce una línea de calentamiento estable hasta los 6 min debido a que el calor interno atraviesa las paredes del reactor de acero inoxidable y pasa hacia la región del agua, la duración del efecto térmico es notorio a partir del minuto 6 generando un pico que no supera los 25°C.

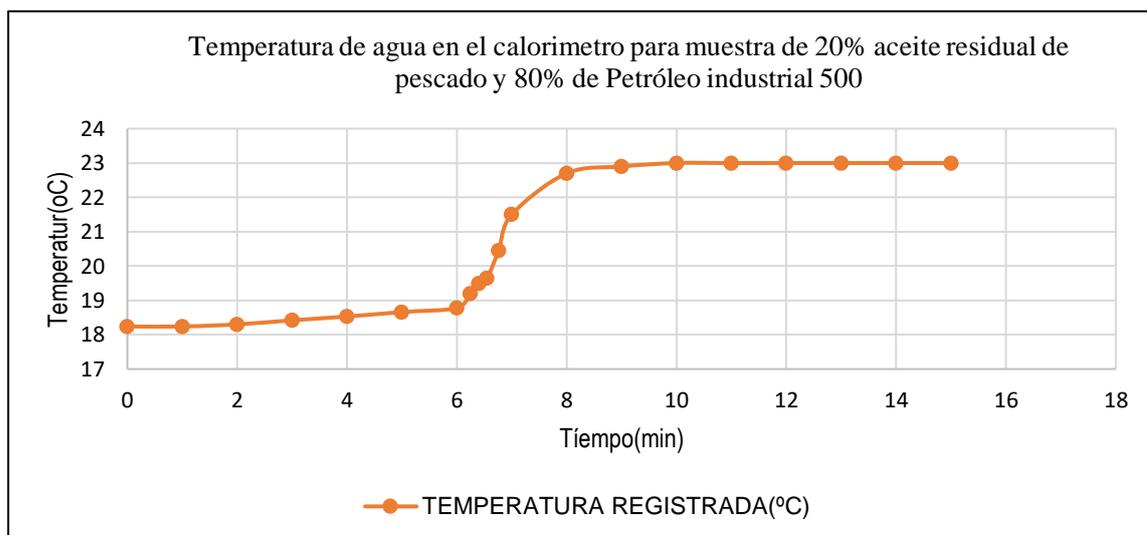


Gráfico 4. Perfil de temperatura para muestra de aceite ácido residual 20% y 80% de Petróleo industrial 500.

De la gráfica 4, se observa que la mezcla de 20% de aceite ácido residual y 80% de Petróleo industrial 500 produce una línea de calentamiento estable hasta los 6,5 min aproximadamente señal que indica que el poder calorífico inferior disminuye ligeramente, debido a ese retardo de tiempo en alcanzar la temperatura hasta 22.9 °C

Para la mezcla de 30 % de aceite ácido residual y 70 % de Petróleo industrial 500, se registró la siguiente tabla de datos.

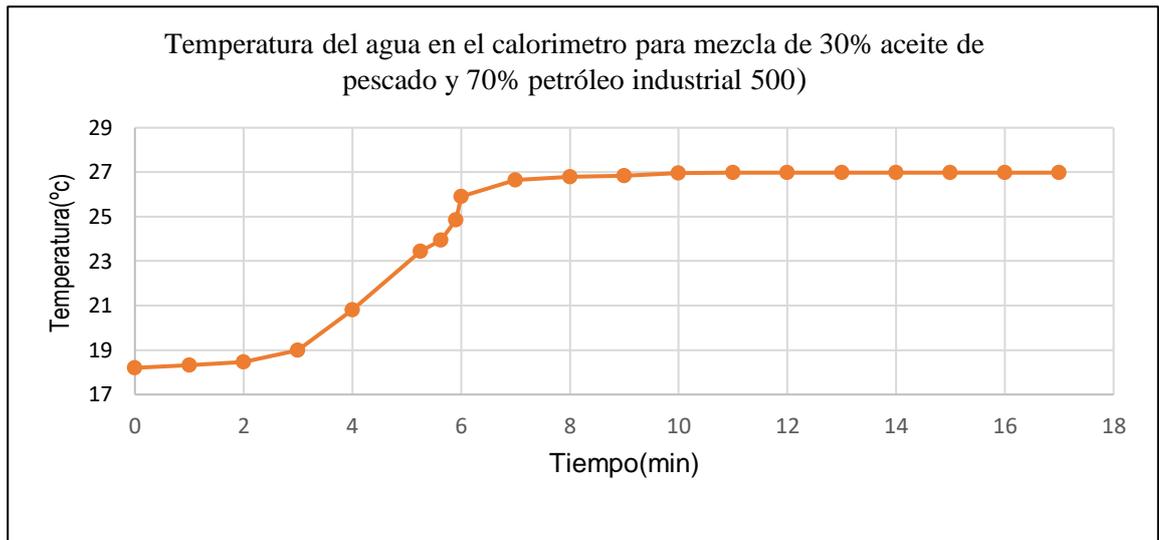


Gráfico 5. Perfil de temperatura para muestra de aceite ácido residual 30% y 70% de Petróleo industrial 500.

De la gráfica 5, se observa que la temperatura de transición inicia a los 3 min aproximadamente de la cual se deduce que la combustión al interior es más intensa y desarrolla más temperatura, además el pico de temperatura alcanzada es 26.98°C Esta condición física de la reacción indica que la relación de mezcla utilizada desarrolla suficiente energía para considerarse una propuesta de mezcla adecuada para realizar ensayos de combustión a escala industriales.

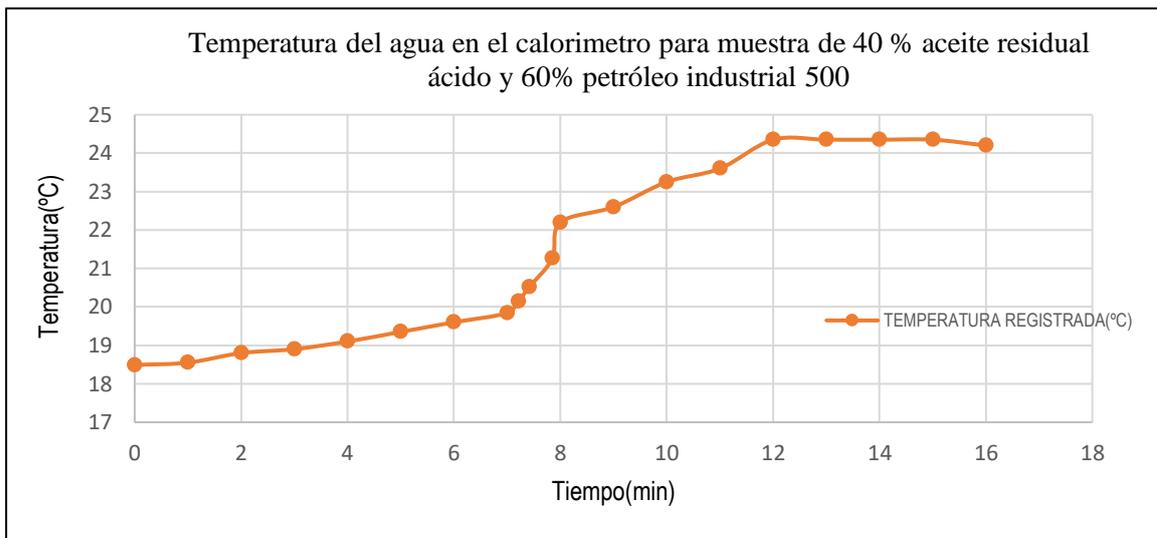


Gráfico 6. Perfil de temperatura para muestra de aceite ácido residual 40% y 60% de Petróleo industrial 500.

De la gráfica 6, se obtiene que en la relación de mezcla 40% aceite ácido residual y 60% de petróleo Industrial 500 la temperatura de transición se extiende casi hasta el min 7 indicando que la combustión no es lo suficientemente intensa como para el calor fluya de manera rápida hacia el exterior del agua, la temperatura máxima alcanzada es 24.35 °C aproximadamente.

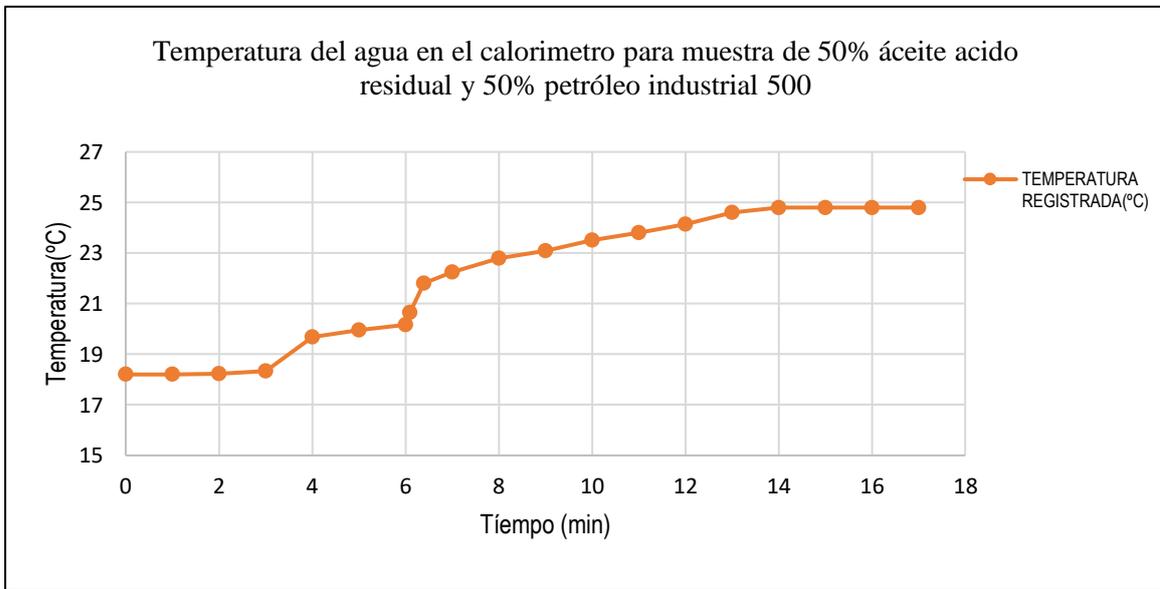


Gráfico 7. Perfil de temperatura para muestra de aceite ácido residual 50% y 50% de petróleo industrial 500.

De la gráfica 7, se obtiene que en la relación de mezcla 50% aceite ácido residual y 50% de Petróleo industrial 500 la temperatura de transición se extiende casi hasta el min 6 indicando que la combustión no es lo suficientemente intensa como para el calor fluya de manera rápida hacia el exterior del agua, la temperatura máxima alcanzada es 24.82 °C aproximadamente. Sin embargo, se obtiene un ligero incremento a los 3 min y dura hasta el minuto 6, luego se genera el pico de transición final.

4.4 ANÁLISIS DE LA TEMPERATURA EN FUNCIÓN DEL TIEMPO DE TRANSICIÓN

El tiempo de transición está referido al cambio de valor notable o brusco que se da en el perfil de la temperatura cuando se experimenta transferencia de calor desde el interior de la bomba calorimétrica hacia la parte exterior de la zona del agua , mediante el siguiente cuadro se registró los tiempos y la temperatura alcanzada en cada experimento según la proporción de mezcla utilizada, estos resultados mostraron de manera física la intensidad del calor liberado manifestado en el gradiente térmico que se diferencia como se observa para cada muestra combustionada.

Tabla 10

Resumen de Tiempo de transición (min) y Temperatura(°C) del agua al interior de la bomba calorimétrica.

Tiempo/Temp eratura	Aceite ácido residual puro(kcal/kg)	Petróleo industrial 500 puro kcal/kg)	20% Aceite ácido residual y 80% petróleo industrial 500(kcal/kg)	30% Aceite ácido residual 70% petróleo industrial 500(kcal/kg)	40% Aceite ácido residual y 60% petróleo industrial 500(kcal/kg)	50% Aceite ácido residual y 50% petróleo industrial 500(kcal/kg)
Tiempo de Transición(min)	6	4	7	4	6	6
Temperat ura de agua (°C)	23	27.02	24.35	26.98	23.75	24.8

Fuente. Elaboración propia

De la tabla 12, se resumen los tiempos de transición de cada reacción de combustión al interior de la bomba calorimétrica, se deduce que el mejor de transición se consigue con la mezcla de 30% de aceite ácido residual y 70% de Petróleo industrial 500 alcanzando una temperatura de 26.98 °C.

A continuación, se grafica los valores de temperaturas y sus tiempos de transición

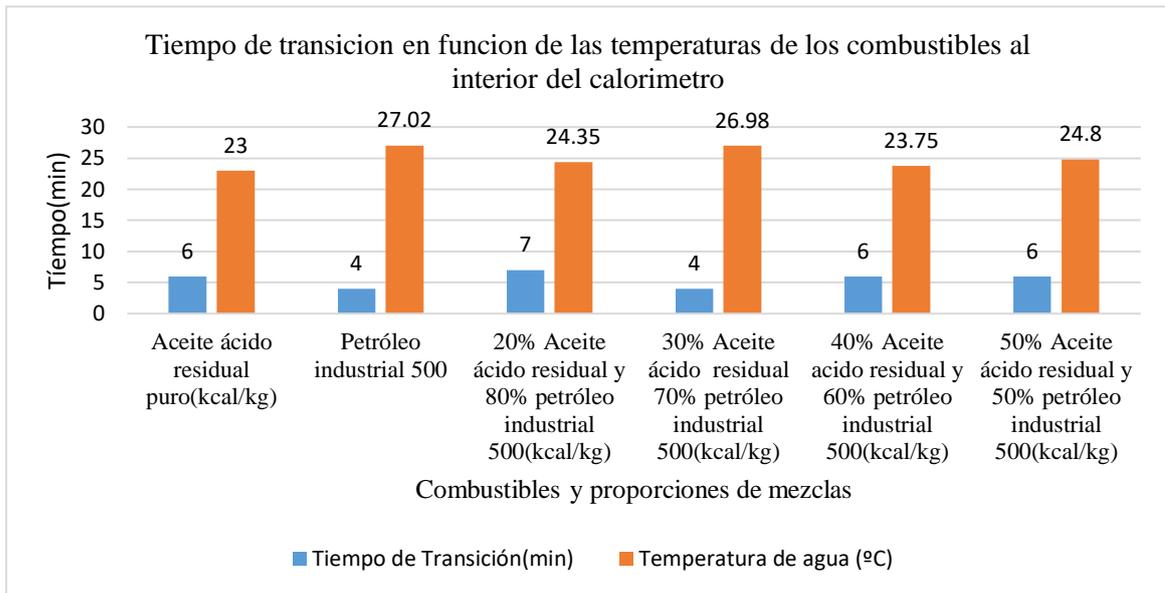


Gráfico 8. Evolución de los tiempos de transición y su temperatura para diversas mezclas

Fuente. Elaboración propia

En la gráfica 8, se describe la evolución de los tiempos de transición de temperatura al interior de la bomba calorimétrica, como se observa el aceite ácido residual y el petróleo industrial combustionados por si solos desprenden un poder calorífico elevado de forma independiente , sin embargo el estudio considera el efecto de la adición de aceite en petróleo industrial 500 para determinar sus características y se observa que el aceite ácido residual puro alcanza una temperatura de 22°C y el petróleo industrial 500 logra 27.02 °C, mezcla que mejor condición o propiedades combustibles genera es la de 30% y 70% respectivamente, debido a que su tiempo de transición es decir el tiempo que le toma al flujo de calor atravesar las paredes del reactor y llegar al agua , es de 4 min , siendo un tiempo igual al de la combustión de petróleo industrial puro.

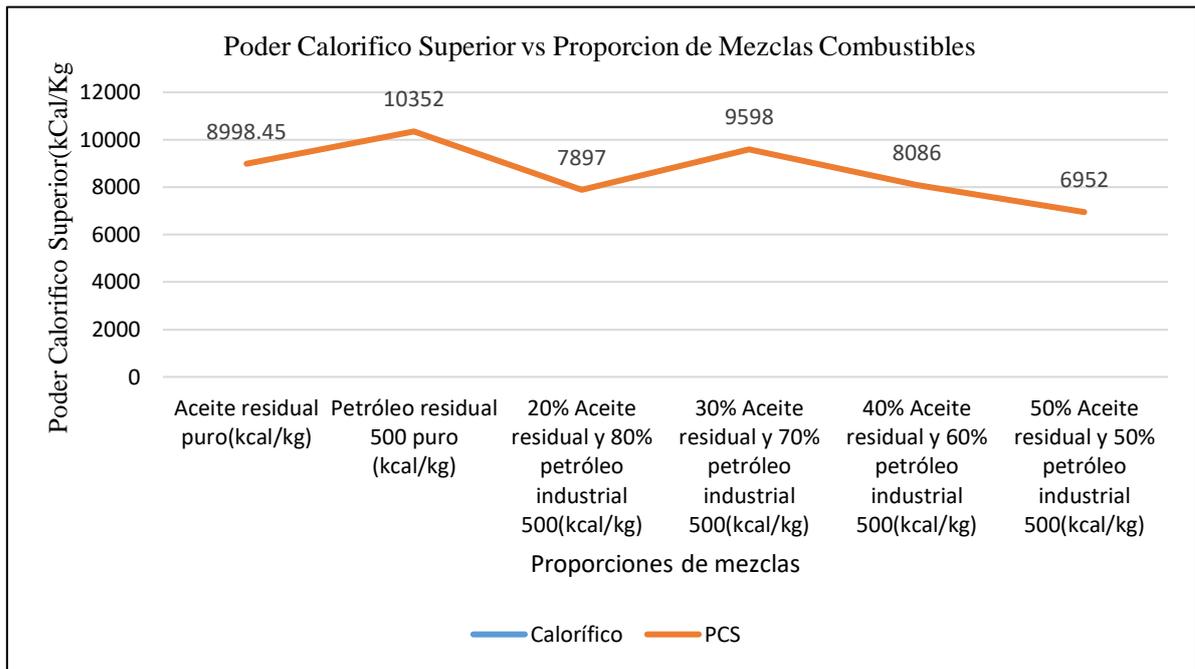


Gráfico 9. Evolución del Poder calorífico superior y proporción de mezclas.

Fuente: Elaboración propia

De la gráfica 9, observamos que el poder calorífico superior del aceite ácido residual y el petróleo son altos sin embargo para las mezclas el mejor valor equivale a la proporción de 30% y 70% respectivamente e indica un valor de 9598 kCal/kg

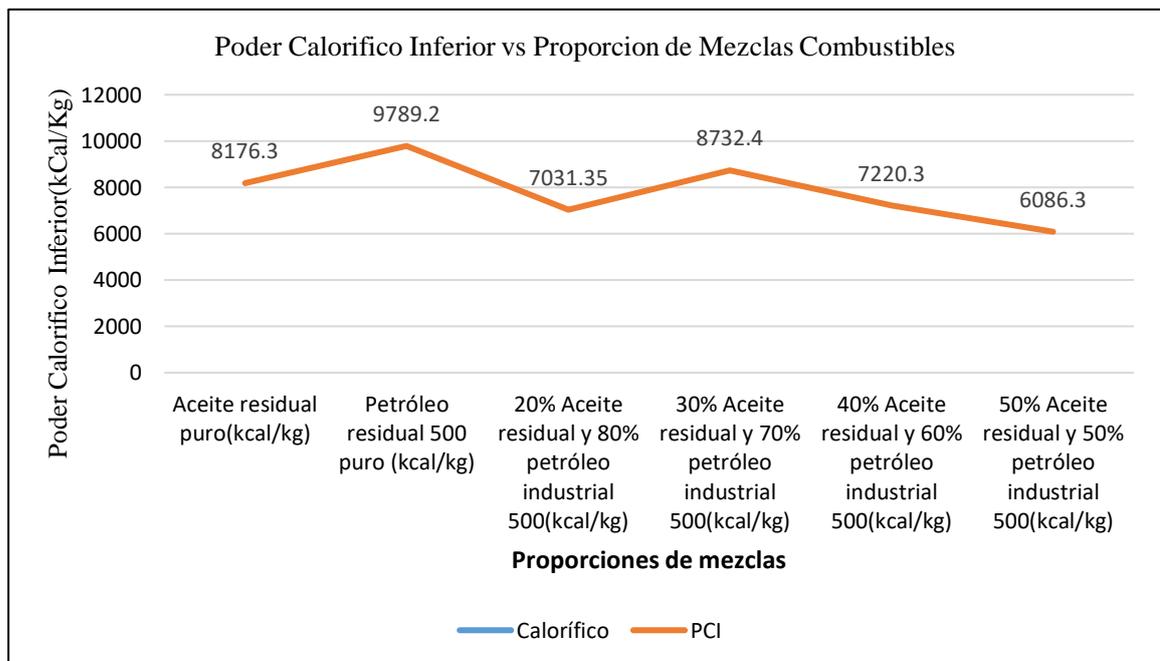


Gráfico 10. Evolución del Poder calorífico inferior y proporción de mezclas.

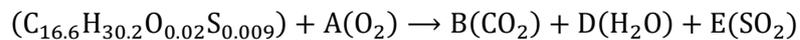
Fuente: Elaboración propia

De la gráfica 10, observamos que el poder calorífico inferior del aceite ácido residual y el petróleo industrial 500 son altos sin embargo para las mezclas el mejor valor equivale a la proporción de 30% y 70% respectivamente indica 8732.4 kCal/kg

4.5 ANÁLISIS ESTEQUIOMÉTRICO DE LA COMBUSTIÓN Y DETERMINACIÓN DE LA ENTALPIA DE COMBUSTIÓN DE LAS MEZCLAS

En esta etapa se procedió a establecer el balance de combustión para conocer la relación de oxígeno sobre el combustible que interactúa en el proceso además se calculó la entalpia de combustión correspondiente a cada porción de mezcla de aceite ácido y petróleo industrial 500.

Estequiometría de reacción de combustión en bomba calorimétrica para petróleo industrial 500 puro.



Haciendo el balance:

$$\text{Carbono} \quad : \quad (16.6) = B \rightarrow B = 16.6$$

$$\text{Hidrógeno} \quad : \quad (30.2) = 2D \rightarrow D = 15.1$$

$$\text{Oxígeno} \quad : \quad (0.02) + 2A = 2B + D + 2E \quad (a)$$

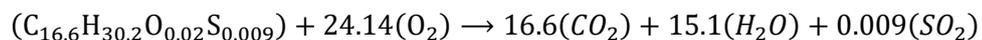
$$\text{Azufre} \quad : \quad (0.009) = E$$

Reemplazando en (a):

$$0.02 + 2A = 2(16.6) + 15.1 + 0.018$$

$$A = 24.14$$

Reconstruyendo la reacción

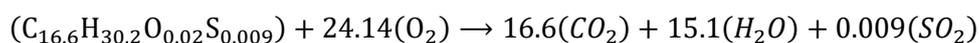


Cálculo de la relación Oxígeno /Combustible en la reacción

$$R_{\text{Oxígeno}/\text{Comb}} = \frac{2 * 16.6 * 16}{[12 * 16.6 + 1 * 30.2 + 16 * 0.02 + 32 * 0.009]}$$

$$R_{\text{Oxígeno}/\text{Comb}} = 2.30$$

Calculando su entalpía de combustión



$$\bar{h}_{comb} = \sum N_P (\bar{h}_f^0 + \bar{h} - \bar{h}_{298}^0)_p - \sum N_R (\bar{h}_f^0 + \bar{h} - \bar{h}_{298}^0)_R$$

Reemplazando se tiene $\Delta\bar{h} = \bar{h} - \bar{h}_{298}^0$

$$\bar{h}_{comb} = 16.6(\bar{h}_{CO_2}) + 15.1(\bar{h}_{H_2O}) - [\bar{h}_{C_{16.6}H_{30.2}O_{0.02}S_{0.009}}](g) - \bar{h}_{24.14}(O_2)$$

$$\bar{h}_{comb} = 16.6(\bar{h}_f^0 + \Delta\bar{h})_{CO_2} + 15.1(\bar{h}_f^0 + \Delta\bar{h})_{H_2O} + 0.009(\bar{h}_f^0 + \Delta\bar{h})_{SO_2} - [(\bar{h}_f^0 + \Delta\bar{h})_{[C_{16.6}H_{30.2}O_{0.02}S_{0.009}]}](g) - (\bar{h}_f^0 + \Delta\bar{h})_{24.14}(O_2)$$

Considerando agua líquida en los productos de combustión se obtendrá su entalpía de combustión.

Tomando datos de tabla A-25 entalpías de formación de Moran y Shapiro.

$$\bar{h}_{comb} = 16.6(-393520) + 15.1(-285830) + 0.009(-29690) - [-126150](g)$$

$$\bar{h}_{comb} = -10722582.21 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}} \text{ (combustible)}$$

Tomando los carbonos e hidrógenos de cada combustible por separado se tiene

$$\text{P.I-500: } [C_{16.6}H_{30.2}O_{0.02}S_{0.009}]: (12 * 16.6 + 1 * 30.2 + 16 * 0.002 + 32 * 0.009) = 230$$

$$\bar{h}_{comb} = \frac{-10722582.21 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}}}{(230) \frac{\text{kg Comb}}{\text{kmol Comb}}} = -46619.922 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = -11153.09 \frac{\text{kCal}}{\text{kg}}$$

$$\bar{h}_{comb} = -11152.81 \frac{\text{kCal}}{\text{kg}}$$

La entalpía de combustión considerando la formación de vapor de agua en los productos de la combustión equivale a 11152.81 kCal/kg, similar al PCS= 10352 kCal/kg.

Considerando agua líquida en los productos de combustión se obtendrá su entalpía de combustión

Tomando datos de tabla A-25 entalpías de formación de Moran y Shapiro.

$$\bar{h}_{comb} = 16.6(-393520) + 15.1(-241820) + 0.009(-29690) - [-126150](g)$$

$$\bar{h}_{comb} = -10\ 058\ 031.21 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}} \text{ (combustible)}$$

Tomando los carbonos e hidrógenos de cada combustible por separado se tiene

$$\text{Petróleo R-500: } [C_{16.6}H_{30.2}O_{0.02}S_{0.009}]: (12 * 16.6 + 1 * 30.2 + 16 * 0.02 + 32 * 0.009) = 230$$

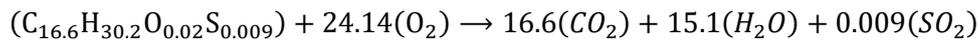
La entalpía de combustión considerando formación de agua líquida en los productos de combustión.

$$\bar{h}_{comb} = \frac{-10\ 058\ 031.21 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}}}{230 \frac{\text{kg Comb}}{\text{kmol Comb}}} = -43730.570 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = -10461.85 \frac{\text{kCal}}{\text{kg}}$$

$$\bar{h}_{comb} = -10461.85 \frac{\text{kCal}}{\text{kg}}$$

La entalpía de combustión considerando la formación de agua líquida en los productos de la combustión equivale a 10461.85 kCal/Kg, similar al PCI=9789.2 kCal/Kg

Cálculo de temperatura de llama adiabática



Iterando mediante ecuaciones de las capacidades caloríficas de los productos de gases de combustión

$$\Delta \bar{h}_T = \int_{298.15}^{T_{ad}} \left(\sum_{\text{productos}} n_i * Cp_i \right) dT$$

Donde el Cp tiene la forma siguiente

$$C_p = R(A + BT + CT^2 + DT^{-2})$$

Aplicando balance a reactantes y productos de la combustión en el calorímetro

$$\bar{h}_{comb} = \sum N_R (\bar{h}_f^0 + \bar{h} - \bar{h}_{298}^0)_R + N_P (\bar{h}_f^0 + \bar{h} - \bar{h}_{298}^0)_P$$

$$\bar{h}_{comb} = [\bar{h}_{C_{16.6}H_{30.2}O_{0.02}S_{0.009}}](g) - \bar{h}_{24.14(O_2)} - [16.6(\bar{h}_{CO_2}) + 15.1(\bar{h}_{H_2O}) + 0.009(\bar{h}_{SO_2})]$$

$$\bar{h}_{comb} = [(\bar{h}_f^0 + \Delta \bar{h})_{[C_{16.6}H_{30.2}O_{0.02}S_{0.009}]}](g) - (\bar{h}_f^0 + \Delta \bar{h})_{24.14(O_2)} - [16.6(\bar{h}_f^0 + \Delta \bar{h})_{CO_2} + 15.1(\bar{h}_f^0 + \Delta \bar{h})_{H_2O} + 0.009(\bar{h}_f^0 + \Delta \bar{h})_{SO_2}]$$

$$\bar{h}_{comb} = [-126150](g) - [16.6(-393520) + 15.1(-241820) + 0.009(-29690)]$$

$$\bar{h}_{comb} = 10\ 058\ 031.21 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}} (\text{combustible})$$

Reemplazando

$$C_{p_{CO_2}} = R(5.457 + 1.045 * 10^{-3}T - 1.157 * 10^5 T^{-2})$$

$$C_{p_{H_2O}} = R(3.47 + 1.45 * 10^{-3}T - 0.121 * 10^5 T^{-2})$$

$$C_{p_{SO_2}} = R(11.4 + 1.88 * 10^{-3}T - 1.84000 * 10^5 T^{-2})$$

Fuente: Robert H. Perry, Don W. Green, James O. Maloney "Perry Manual de Ingeniero Químico" 6ª Edición, McGraw Hill, México 1994, Tomo I, p.p. 3-155 – 3-162.

$$\Delta \bar{h}_T = R \int_{298.15}^{T_{ad}} [16.6(5.457 + 1.045 * 10^{-3} - 1.157 * 10^5 T^{-2}) + 15.1(3.47 + 1.45 * 10^{-3} T - 0.121 * 10^5 T^{-2}) + 0.009(11.4 + 1.88 * 10^{-3} T - 1.84000 * 10^5 T^{-2})] dT$$

Reduciendo términos semejantes se obtiene

$$\Delta \bar{h}_T = R \int_{298.15}^{T_{ad}} [143.0585 + 0.03925892 (T) - 17.39566 (T)^{-2}] dT$$

Integrando se obtiene

$$\Delta \bar{h}_T = 143.0858(T) + 0.0196246(T)^2 + \frac{1739566}{T}$$

$$\bar{h}_{comb} = \Delta \bar{h}_T = 10\ 058\ 031.21 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}}$$

Mediante métodos numéricos, aplicamos método de Newton Raphson para evaluar la temperatura de llama adiabática en un polinomio de la forma siguiente.

$$T_{ad(n+1)} = T_{ad(n)} - \frac{f(T_{ad(n)})}{d(T_{ad(n)})}$$

$$10\ 058\ 031.21 = 143.0858(T) + 0.0196246(T)^2 + \frac{1739566}{T}$$

$$f(T_{ad}) = 143.0858(T) + 0.0196246(T)^2 + \frac{1739566}{T} - 10\ 058\ 031.21$$

$$f(T_{ad}) = 143.0858(T) + 0.0196246(T)^2 + \frac{1739566}{T} - 10102437.17 \quad (**)$$

Derivando la expresión (**), se obtiene

$$\frac{d(f(T_{ad}))}{d(T_{ad})} = 143.08558 + 0.03925892(T) - \frac{1739566}{T^2}$$

Dando forma a la siguiente expresión, según método de polinomio de Newton Raphson

$$T_{ad(n+1)} = T_{ad(n)} - \frac{f(T_{ad(n)})}{d(T_{ad(n)})}$$

Reemplazando

$$T_{ad(n+1)} = 143.0858(T) + 0.0196246(T)^2 + \frac{1739566}{T} - 44405.96115 - \frac{143.0858(T) + 0.0196246(T)^2 + \frac{1739566}{T} - 10102437.17}{143.08558 + 0.03925892(T) - \frac{1739566}{T^2}}$$

dando forma al polinomio para insertar datos (grado máximo y coeficientes del polinomio).

Grado de la Ecuación: 3

Coeficiente 0 = Cx⁰: 1739566

Coeficiente 1 = Cx¹: 0

Coeficiente 2 = Cx²: 143.08558

Coeficiente 3 = Cx³: 0.03925892

Limpiar Valores

Valor raíz [Xo]: 0.5

Iterar por Newton-Raphson

Resultado: -3647.9938112538

No de Iteraciones: 9

Puede consultar la tabla de las evaluaciones e iteraciones en la hoja de cálculo.

Nota: Este sencillo programa solo resuelve ecuaciones lineales no mayores de grado 10.

Salir

Tabla 11

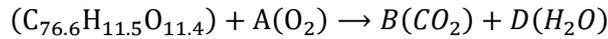
Convergencia de temperatura de llama adiabática (xi), P.I.500

i	Xi	F(Xn)	F'(Xn)	Xi - Xn
0	0.5	1739601.78	143.115024	3545.32304
1	-8609.44708	-4.9357E+10	13921809.7	2305.34868
2	-6304.0984	-1.4446E+10	6266141.74	1441.82689
3	-4862.2715	-4147548283	2876592.4	810.0357
4	-4052.2358	-1128378990	1392999.09	337.068787
5	-3715.16702	-261003758	774333.812	64.8318874
6	-3650.33513	-36463791.7	562436.066	2.33832155
7	-3647.99681	-1227030.48	524748.394	0.00299549
8	-3647.99381	-1567.86168	523407.594	4.9122E-09
9	-3647.99381	-0.00257104	523405.877	

Fuente. Elaboración propia

La temperatura de llama adiabática es 3647.99 K

Estequiometría de reacción de combustión en bomba calorimétrica para aceite puro



Haciendo el balance

$$\text{Carbono} \quad : \quad (76.6) = B \rightarrow B = 76.6$$

$$\text{Hidrógeno} \quad : \quad (11.5) = 2D \rightarrow D = 5.75$$

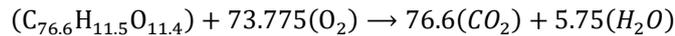
$$\text{Oxígeno} \quad : \quad (11.4) + 2A = 2B + D \quad (a)$$

Reemplazando en (a):

$$11.4 + 2A = 2(76.6) + 5.75$$

$$A = 73.775$$

Reconstruyendo la reacción

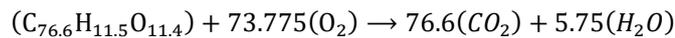


Cálculo de la relación Oxígeno /Combustible en la reacción

$$R_{\text{Oxígeno}/\text{Comb}} = \frac{2 * 73.775 * 16}{[12 * 76.6 + 1 * 11.5 + 16 * 11.4]}$$

$$R_{\text{Oxígeno}/\text{Comb}} = 2.12$$

Calculando su entalpía de combustión



$$\bar{h}_{comb} = \sum N_P (\bar{h}_f^0 + \bar{h} - \bar{h}_{298}^0)_P - \sum N_R (\bar{h}_f^0 + \bar{h} - \bar{h}_{298}^0)_R$$

Reemplazando se tiene $\Delta \bar{h} = \bar{h} - \bar{h}_{298}^0$

$$\bar{h}_{comb} = 76.6(\bar{h}_{CO_2}) + 5.75(\bar{h}_{H_2O}) - [\bar{h}_{0.20(C_{76.6}H_{11.5}O_{11.4})}(g) - \bar{h}_{73.775(O_2)}]$$

$$\bar{h}_{comb} = 76.6(\bar{h}_f^0 + \Delta \bar{h})_{CO_2} + 5.75(\bar{h}_f^0 + \Delta \bar{h})_{H_2O} - \left[(\bar{h}_f^0 + \Delta \bar{h})_{[(C_{76.6}H_{11.5}O_{11.4})](g)} \right] - (\bar{h}_f^0 + \Delta \bar{h})_{73.775(O_2)}$$

Considerando agua líquida en los productos de combustión se obtendrá su entalpía de combustión

Tomando datos de tabla A-25 entalpías de formación de Moran y Shapiro.

$$\bar{h}_{comb} = 76.6(-393520) + 5.75(-285830) - [-103850](g)$$

$$\bar{h}_{comb} = -31683304.5 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}} (\text{combustible})$$

Tomando los carbonos e hidrógenos de cada combustible por separado se tiene

$$\text{Aceite: } [C_{76.6}H_{11.5}O_{11.4}]: (12 * 76.6 + 1 * 11.5) = 930.7$$

$$\bar{h}_{comb} = \frac{-31683304.5 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}}}{(930.7) \frac{\text{kg Comb}}{\text{kmol Comb}}} = -34042.44 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = -8144.12 \frac{\text{kCal}}{\text{kg}}$$

$$\bar{h}_{comb} = -8144.12 \frac{\text{kCal}}{\text{kg}}$$

La entalpía de combustión considerando la formación de vapor de agua en los productos de la combustión equivale a 8144.12 kCal/Kg, similar al PCS=8998.45 kCal/Kg.

Considerando agua líquida en los productos de combustión se obtendrá su entalpía de combustión.

Tomando datos de tabla A-25 entalpias de formación de Moran y Shapiro.

$$\bar{h}_{comb} = 76.6(-393520) + 5.75(-241820) - [-103850](g)$$

$$\bar{h}_{comb} = -28649317 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}} (\text{combustible})$$

Tomando los carbonos e hidrógenos de cada combustible por separado se tiene

$$\text{Aceite: } [C_{76.6}H_{11.5}O_{11.4}]: (12 * 76.6 + 1 * 11.5) = 930.7$$

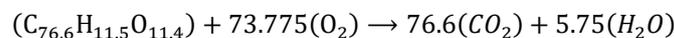
La entalpía de combustión considerando formación de agua líquida en los productos de combustión.

$$\bar{h}_{comb} = \frac{-28649317 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}}}{930.7 \frac{\text{kg Comb}}{\text{kmol Comb}}} = -30782.54 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = -7364.2458 \frac{\text{kCal}}{\text{kg}}$$

$$\bar{h}_{comb} = -7417.63 \frac{\text{kCal}}{\text{kg}}$$

La entalpía de combustión considerando la formación de agua líquida en los productos de la combustión equivale a 7364.2458 kCal/kg, similar al PCI=8173.6 kCal/kg.

Cálculo de temperatura de llama adiabática



Iterando mediante ecuaciones de las capacidades caloríficas de los productos de gases de combustión

$$\Delta \bar{h}_T = \int_{298.15}^{T_{ad}} \left(\sum_{\text{productos}} n_i * C_{p_i} \right) dT$$

donde el Cp tiene la forma siguiente

$$C_p = R(A + BT + CT^2 + DT^{-2})$$

Aplicando balance a reactantes y productos de la combustión en el calorímetro

$$\bar{h}_{\text{comb}} = \sum N_R (\bar{h}_f^0 + \bar{h} - \bar{h}_{298}^0)_R - N_P (\bar{h}_f^0 + \bar{h} - \bar{h}_{298}^0)_P$$

$$\bar{h}_{\text{comb}} = [\bar{h}_{\text{C}_{76.6}\text{H}_{11.5}\text{O}_{11.4}}]_{(g)} - \bar{h}_{73.775(\text{O}_2)} - [76.6(\bar{h}_{\text{CO}_2}) + 5.75(\bar{h}_{\text{H}_2\text{O}})]$$

$$\bar{h}_{\text{comb}} = [(\bar{h}_f^0 + \Delta \bar{h})_{\text{C}_{76.6}\text{H}_{11.5}\text{O}_{11.4}}]_{(g)} - (\bar{h}_f^0 + \Delta \bar{h})_{73.775(\text{O}_2)} - [76.6(\bar{h}_f^0 + \Delta \bar{h})_{\text{CO}_2} + 5.75(\bar{h}_f^0 + \Delta \bar{h})_{\text{H}_2\text{O}}]$$

$$\bar{h}_{\text{comb}} = [-103850](1) - [76.6(-393520) + 5.75(-241820)]$$

$$\bar{h}_{\text{comb}} = 28\,649\,317 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}} (\text{combustible})$$

Reemplazando

$$C_{p_{\text{CO}_2}} = R(5.457 + 1.045 * 10^{-3}T - 1.157 * 10^5 T^{-2})$$

$$C_{p_{\text{H}_2\text{O}}} = R(3.47 + 1.45 * 10^{-3}T - 0.121 * 10^5 T^{-2})$$

$$\Delta \bar{h}_T = R \int_{298.15}^{T_{ad}} [76.6(5.457 + 1.045 * 10^{-3}T - 1.157 * 10^5 T^{-2}) + 5.75(3.47 + 1.45 * 10^{-3}T - 0.121 * 10^5 T^{-2})] dT$$

Reduciendo términos semejantes se obtiene

$$\Delta \bar{h}_T = R \int_{298.15}^{T_{ad}} [427.2262 + 0.0883845 (T) - 8932195 (T)^{-2}] dT$$

Integrando se obtiene

$$\Delta \bar{h}_T = 427.2262(T) + 0.04419225(T)^2 + \frac{8932195}{T}$$

$$\bar{h}_{\text{comb}} = 28\,649\,317 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}}$$

Mediante métodos numéricos, aplicamos método de Newton Raphson para evaluar la temperatura de llama adiabática en un polinomio de la forma siguiente.

$$T_{ad(n+1)} = T_{ad(n)} - \frac{f(T_{ad(n)})}{d(T_{ad(n)})}$$

$$28\,649\,317 = 427.2262(T) + 0.04419225(T)^2 + \frac{8932195}{T}$$

$$f(T_{ad}) = 427.2262(T) + 0.04419225(T)^2 + \frac{8932195}{T} - 28649317$$

$$f(T_{ad}) = 427.2262(T) + 0.04419225(T)^2 + \frac{8932195}{T} - 28649317 \quad (**)$$

Derivando la expresión (**), se obtiene

$$\frac{d(f(T_{ad}))}{d(T_{ad})} = 427.2262 + 0.0883845(T) - \frac{8932195}{T^2}$$

Dando forma a la siguiente expresión, según método de polinomio de Newton Raphson

$$T_{ad(n+1)} = T_{ad(n)} - \frac{f(T_{ad(n)})}{d(T_{ad(n)})}$$

Reemplazando

$$T_{ad(n+1)} = 143.0858(T) + 0.0196246(T)^2 + \frac{1739566}{T} - \frac{143.0858(T) + 0.0196246(T)^2 + \frac{1739566}{T} - 10102437.17}{143.0858 + 0.03925892(T) - \frac{1739566}{T^2}}$$

dando forma al polinomio para insertar datos (grado máximo y coeficientes del polinomio).

Resolver Ecuaciones Polinomiales por el Metodo Newton - Raphson

Grado de la Ecuación

Coficiente 0 = Cx⁰

Coficiente 1 = Cx¹

Coficiente 2 = Cx²

Coficiente 3 = Cx³

Limpiar Valores

Valor raíz [Xo]

Iterar por Newton-Raphson

Resultado

No de Iteraciones

Puede consultar la tabla de las evaluaciones e iteraciones en la hoja de cálculo.

Tabla 12

Convergencia de temperatura de llama adiabática (xi) , AAR

i	Xi	F(Xn)	F'(Xn)	Xi - Xn
0	0.5	8932301.82	427.2924884	6332.917879
1	-14571.0025	-6.2065E+11	98003751.04	4167.209519
2	-10403.793	-1.8271E+11	43845602.58	2689.394784
3	-7714.39823	-5.3278E+10	19810379.69	1648.114378
4	-6066.28385	-1.5143E+10	9188213.124	874.4636617
5	-5191.82019	-4000010962	4574244.919	311.3923235
6	-4880.42787	-844199707	2711048.551	41.66438755
7	-4838.76348	-89390340.8	2145485.536	0.722552616
8	-4838.04093	-1498367.05	2073713.412	0.000215568
9	-4838.04071	-446.758864	2072476.845	2.00089E-11
10	-4838.04071	-4.157E-05	2072476.476	

La temperatura de llama adiabática es 4838.040 K

Estequiometria de reacción de combustión en bomba calorimétrica para 20% aceite ácido y 80% petróleo industrial 500 puro



Haciendo el balance

$$\text{Carbono} \quad : \quad 0.20(76.6) + 0.80(16.6) = B \rightarrow B = 28.6$$

$$\begin{aligned}
\text{Hidrógeno} & : & 0.20(11.5) + 0.80(30.2) = 2D \rightarrow D = 13.23 \\
\text{Oxígeno} & : & 0.20(11.4) + 0.80(0.02) + 2A = 2B + D + 2E \quad (a) \\
\text{Azufre} & : & 0.80(0.009) = E
\end{aligned}$$

Reemplazando en (a):

$$0.20(11.4) + 0.80(0.02) + 2A = 2(28.6) + 13.23 + 0.0144$$

$$A = 34.074$$

Reconstruyendo la reacción



Cálculo de la relación Oxígeno /Combustible en la reacción

$$\begin{aligned}
R_{\text{Oxígeno}/\text{Comb}} &= \frac{2 * 34.074 * 16}{0.2[12 * 76.6 + 1 * 11.5 + 16 * 11.4] + 0.8[12 * 16.6 + 1 * 30.2 + 16 * 0.02 + 32 * 0.009]} \\
R_{\text{Oxígeno}/\text{Comb}} &= 2.920
\end{aligned}$$

Calculando su entalpía de combustión



$$\bar{h}_{comb} = \sum N_P (\bar{h}_f^0 + \bar{h} - \bar{h}_{298}^0)_P - \sum N_R (\bar{h}_f^0 + \bar{h} - \bar{h}_{298}^0)_R$$

Reemplazando se tiene $\Delta\bar{h} = \bar{h} - \bar{h}_{298}^0$

$$\begin{aligned}
\bar{h}_{comb} &= 28.6(\bar{h}_{\text{CO}_2}) + 13.23(\bar{h}_{\text{H}_2\text{O}}) + 7.2 * 10^{-3}(\bar{h}_{\text{SO}_2}) - 0.20[\bar{h}_{(\text{C}_{76.6}\text{H}_{11.5}\text{O}_{11.4})}](g) - 0.80[\bar{h}_{(\text{C}_{16.6}\text{H}_{30.2}\text{O}_{0.02}\text{S}_{0.009})}](g) \\
&\quad - 34.7\bar{h}_{(\text{O}_2)}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\bar{h}_{comb} &= 28.6(\bar{h}_f^0 + \Delta\bar{h})_{\text{CO}_2} + 13.23(\bar{h}_f^0 + \Delta\bar{h})_{\text{H}_2\text{O}} + 7.2 * 10^{-3}(\bar{h}_f^0 + \Delta\bar{h})_{\text{SO}_2} \\
&\quad - 0.20 \left[(\bar{h}_f^0 + \Delta\bar{h})_{[(\text{C}_{76.6}\text{H}_{11.5}\text{O}_{11.4})](g)} \right] (g) \\
&\quad - 0.80 \left[(\bar{h}_f^0 + \Delta\bar{h})_{[(\text{C}_{16.6}\text{H}_{30.2}\text{O}_{0.02}\text{S}_{0.009})](g)} \right] - (\bar{h}_f^0 + \Delta\bar{h})_{34.074(\text{O}_2)}
\end{aligned}$$

Considerando agua líquida en los productos de combustión se obtendrá su entalpía de combustión.

Tomando datos de tabla A-25 entalpias de formación de Moran y Shapiro.

$$\bar{h}_{comb} = 28.6(-393520) + 13.23(-285830) + 7.2 * 10^{-3}(0) - [-103850](g) - [-126150](g)$$

$$\bar{h}_{comb} = -14806202.9 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}} (\text{combustible})$$

Tomando los carbonos e hidrógenos de cada combustible por separado se tiene

$$\text{Aceite: } 20\%[C_{76.6}H_{11.5}O_{11.4}]: 20\%(12 * 76.6 + 1 * 11.5) = 186.14$$

$$\text{Petróleo: } 80\%[C_{16.6}H_{30.2}O_{0.02}S_{0.009}]: 80\%(12 * 16.6 + 1 * 30.2) = 183.52$$

$$\bar{h}_{comb} = \frac{-14806202.9 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}}}{(186.14 + 183.52) \frac{\text{kg Comb}}{\text{kmol Comb}}} = -40053.570 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = -9582.19 \frac{\text{kCal}}{\text{kg}}$$

$$\bar{h}_{comb} = -9582.19 \frac{\text{kCal}}{\text{kg}}$$

La entalpía de combustión considerando la formación de vapor de agua en los productos de la combustión equivale a 9582.19 kCal/kg, similar al PCS=7897 kCal/kg.

Considerando agua líquida en los productos de combustión se obtendrá su entalpía de combustión

Tomando datos de tabla A-25 entalpías de formación de Moran y Shapiro.

$$\bar{h}_{comb} = 28.6(-393520) + 13.23(-241820) + 7.2 * 10^{-3}(0) - [-103850](g) - [-126150](g) - [7.2 * 10^{-3}(-29690)]$$

$$\bar{h}_{comb} = -14332474.37 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}} (\text{combustible})$$

Tomando los carbonos e hidrógenos de cada combustible por separado se tiene

$$\text{Aceite: } 20\%[C_{76.6}H_{11.5}O_{11.4}]: 20\%(12 * 76.6 + 1 * 11.5) = 186.14$$

$$\text{Petróleo: } 80\%[C_{16.6}H_{30.2}O_{0.02}S_{0.009}]: 80\%(12 * 16.6 + 1 * 30.2) = 183.52$$

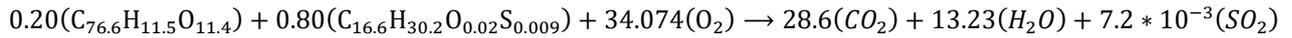
La entalpía de combustión considerando formación de agua líquida en los productos de combustión

$$\bar{h}_{comb} = \frac{-14332474.37}{279.21 + 160.58} = -32589.3594 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = -7796.497 \frac{\text{kCal}}{\text{kg}}$$

$$\bar{h}_{comb} = -7796.497 \frac{\text{kCal}}{\text{kg}}$$

La entalpía de combustión considerando la formación de agua líquida en los productos de la combustión equivale a 7737.46 kCal/Kg, similar al PCI=7031.35 kCal/Kg.

Cálculo de temperatura de llama adiabática



Iterando mediante ecuaciones de las capacidades caloríficas de los productos de gases de combustión.

$$\Delta \bar{h}_T = \int_{298.15}^{T_{ad}} \left(\sum_{\text{productos}} n_i * Cp_i \right) dT$$

Donde el Cp tiene la forma siguiente

$$C_p = R(A + BT + CT^2 + DT^{-2})$$

Aplicando balance a reactantes y productos de la combustión en el calorímetro

$$\bar{h}_{\text{comb}} = \sum N_R (\bar{h}_f^0 + \bar{h} - \bar{h}_{298}^0)_R - \sum N_P (\bar{h}_f^0 + \bar{h} - \bar{h}_{298}^0)_P$$

$$\begin{aligned} \bar{h}_{\text{comb}} &= 0.20[\bar{h}_{C_{76.6}H_{11.5}O_{11.4}}](g) + 0.80[\bar{h}_{C_{16.6}H_{30.2}O_{0.02}S_{0.009}}] + 34.074[\bar{h}_{(O_2)}] \\ &- [28.6(\bar{h}_{(CO_2)}) + 13.23(\bar{h}_{(H_2O)}) + 7.2 * 10^{-3}(\bar{h}_{(SO_2)})] - [76.6(\bar{h}_{CO_2}) + 5.75(\bar{h}_{H_2O})] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{h}_{\text{comb}} &= 0.20 [(\bar{h}_f^0 + \Delta \bar{h})_{C_{76.6}H_{11.5}O_{11.4}}](g) + 0.80 [(\bar{h}_f^0 + \Delta \bar{h})_{C_{16.6}H_{30.2}O_{0.02}S_{0.009}}] + 34.074 [(\bar{h}_f^0 + \Delta \bar{h})_{(O_2)}] \\ &- [28.6((\bar{h}_f^0 + \Delta \bar{h})_{(CO_2)}) + 13.23((\bar{h}_f^0 + \Delta \bar{h})_{(H_2O)}) + 7.2 * 10^{-3}((\bar{h}_f^0 + \Delta \bar{h})_{(SO_2)})] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{h}_{\text{comb}} &= 0.20[-103850](g) + 0.80[-126150](l) + 34.074(0) \\ &- [28.6(-393520) + 13.23(-241820) + 7.2 * 10^{-3}(-29690)] \end{aligned}$$

$$\bar{h}_{\text{comb}} = 14332474.37 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}} (\text{combustible})$$

Reemplazando

$$C_{p_{CO_2}} = R(5.457 + 1.045 * 10^{-3}T - 1.157 * 10^5T^{-2})$$

$$C_{p_{H_2O}} = R(3.47 + 1.45 * 10^{-3}T - 0.121 * 10^5T^{-2})$$

$$C_{p_{SO_2}} = R(11.4 + 1.88 * 10^{-3}T - 1.84000 * 10^5T^{-2})$$

$$\begin{aligned} \Delta \bar{h}_T &= R \int_{298.15}^{T_{ad}} [28.6(5.457 + 1.045 * 10^{-3}T - 1.157 * 10^5T^{-2}) \\ &+ 13.23(3.47 + 1.45 * 10^{-3}T - 0.121 * 10^5T^{-2}) + 7.2 * 10^{-3}(11.4 + 1.88 * 10^{-3}T \\ &- 1.84 * 10^5T^{-2})] dT \end{aligned}$$

Reduciendo términos semejantes se obtiene

$$\Delta \bar{h}_T = R \int_{298.15}^{T_{ad}} [202.06038 + 0.049084036 (T) - 34704227.8(T)^{-2}] dT$$

Integrando se obtiene

$$\Delta \bar{h}_T = 202.06038(T) + 0.024542018(T)^2 + \frac{3470427.8}{T}$$

$$\bar{h}_{comb} = 14332474.37 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}}$$

Mediante métodos numéricos, aplicamos método de Newton Raphson para evaluar la temperatura de llama adiabática en un polinomio de la forma siguiente.

$$T_{ad(n+1)} = T_{ad(n)} - \frac{f(T_{ad(n)})}{d(T_{ad(n)})}$$

$$14332474.37 = 202.06038(T) + 0.024542018(T)^2 + \frac{34704227.8}{T}$$

$$f(T_{ad}) = 202.06038(T) + 0.024542018(T)^2 + \frac{3470427.8}{T} - 14332474.37 \quad (**)$$

Derivando la expresión (**), se obtiene

$$\frac{d(f(T_{ad}))}{d(T_{ad})} = 202.06038 + 0.049084036(T) - \frac{3470427.8}{T^2}$$

Dando forma a la siguiente expresión, según método de polinomio de Newton Raphson

$$T_{ad(n+1)} = T_{ad(n)} - \frac{f(T_{ad(n)})}{d(T_{ad(n)})}$$

Reemplazando

dando forma al polinomio para insertar datos (grado máximo y coeficientes del polinomio)

Resolver Ecuaciones Polinomiales por el Metodo Newton - Raphson

Grado de la Ecuación

Coefficiente 0 = Cx⁰
 Coeficiente 1 = Cx¹
 Coeficiente 2 = Cx²
 Coeficiente 3 = Cx³

Valor raíz [Xo]

Resultado
 No de Iteraciones

Puede consultar la tabla de las evaluaciones e iteraciones en la hoja de cálculo.

Tabla 13.

Convergencia de temperatura de llama adiabática mezcla 20% AAR y 80% P.I. N° 500.

i	Xi	F(Xn)	F'(Xn)	Xi - Xn
0	0.5	3470478.32	202.097193	5179.435497
1	-11992.3877	-1.8895E+11	36480961.6	3404.109722
2	-8588.27801	-5.5593E+10	16331037.08	2190.080645
3	-6398.19736	-1.6186E+10	7390395.985	1330.759866
4	-5067.43749	-4581014121	3442404.779	689.367412
5	-4378.07008	-1194962443	1733418.817	230.2590602
6	-4147.81102	-242505486	1053185.425	26.67900664
7	-4121.13202	-22868130.4	857158.2412	0.347089607
8	-4120.78493	-289977.715	835454.9084	5.83865E-05
9	-4120.78487	-48.7628799	835173.9328	1.81899E-12
10	-4120.78487	-1.3181E-06	835173.8856	

Fuente. Elaboración propia

La temperatura de llama adiabática es 4120.78487 K

Estequiometría de reacción de combustión en bomba calorimétrica para 30% Aceite ácido y 70% petróleo industrial 500 puro



Haciendo el balance

Carbono : $0.30(76.6) + 0.70(16.6) = B \rightarrow B = 34.6$

Hidrógeno : $0.30(11.5) + 0.70(30.2) = 2D \rightarrow D = 12.295$

Oxigeno : $0.30(11.4) + 0.70(0.02) + 2A = 2B + D + 2E$ (a)

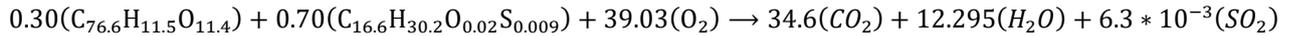
$$\text{Azufre} \quad : \quad 0.70(0.009) = E$$

Reemplazando en (a)

$$0.30(11.4) + 0.70(0.02) + 2A = 2(34.6) + 12.295 + 0.0126$$

$$A = 39.03$$

Reconstruyendo la reacción

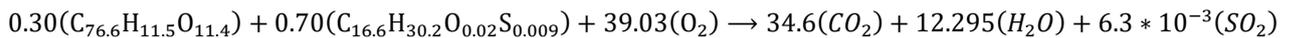


Cálculo de la relación Oxígeno /Combustible en la reacción

$$R_{\text{Oxígeno}/\text{Comb}} = \frac{2 * 39.03 * 16}{0.3[12 * 76.6 + 1 * 11.5 + 16 * 11.4] + 0.7[12 * 16.6 + 1 * 30.2 + 16 * 0.02 + 32 * 0.009]}$$

$$R_{\text{Oxígeno}/\text{Comb}} = 2.806$$

Calculando la entalpía de combustión



$$\bar{h}_{comb} = \sum N_P (\bar{h}_f^0 + \bar{h} - \bar{h}_{298}^0)_P - \sum N_R (\bar{h}_f^0 + \bar{h} - \bar{h}_{298}^0)_R$$

Reemplazando se tiene $\Delta \bar{h} = \bar{h} - \bar{h}_{298}^0$

$$\bar{h}_{comb} = 34.6(\bar{h}_{\text{CO}_2}) + 12.295(\bar{h}_{\text{H}_2\text{O}}) + 6.3 * 10^{-3}(\bar{h}_{\text{SO}_2}) - [\bar{h}_{0.30(\text{C}_{76.6}\text{H}_{11.5}\text{O}_{11.4})}](g) - [\bar{h}_{0.70(\text{C}_{16.6}\text{H}_{30.2}\text{O}_{0.02}\text{S}_{0.009})}](g) - \bar{h}_{39.03(\text{O}_2)}$$

$$\bar{h}_{comb} = 34.6(\bar{h}_f^0 + \Delta \bar{h})_{\text{CO}_2} + 12.295(\bar{h}_f^0 + \Delta \bar{h})_{\text{H}_2\text{O}} + 6.3 * 10^{-3}(\bar{h}_f^0 + \Delta \bar{h})_{\text{SO}_2} - [(\bar{h}_f^0 + \Delta \bar{h})_{0.30(\text{C}_{76.6}\text{H}_{11.5}\text{O}_{11.4})}](g) - [(\bar{h}_f^0 + \Delta \bar{h})_{0.70(\text{C}_{16.6}\text{H}_{30.2}\text{O}_{0.02}\text{S}_{0.009})}](g) - (\bar{h}_f^0 + \Delta \bar{h})_{1,2*16(\text{O}_2)}$$

Considerando agua líquida en los productos de combustión se obtendrá su entalpía de combustión

Tomando datos de tabla A-25 entalpías de formación de Moran y Shapiro.

$$\bar{h}_{comb} = 34.6(-393520) + 12.295(-285830) + 6.3 * 10^{-3}(0) - [-103850](g) - [-126150](g)$$

$$\bar{h}_{comb} = -16900071.85 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}} (\text{combustible})$$

Tomando los carbonos e hidrógenos de cada combustible por separado se tiene

$$\text{Aceite: } 30\%[\text{C}_{76.6}\text{H}_{11.5}\text{O}_{11.4}]: 30\%(12 * 76.6 + 1 * 11.5) = 279.21$$

Petróleo: 70% $[C_{16.6}H_{30.2}O_{0.02}S_{0.009}]$: 70%(12 * 16.6 + 1 * 30.2) = 160.58

$$\bar{h}_{comb} = \frac{-16900071.85 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}}}{(279.21 + 160.58) \frac{\text{kg Comb}}{\text{kmol Comb}}} = -38427.59 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = -9193.20 \frac{\text{kCal}}{\text{kg}}$$

$$\bar{h}_{comb} = -9193.20 \frac{\text{kCal}}{\text{kg}}$$

La entalpía de combustión considerando la formación de vapor de agua en los productos de la combustión equivale a 9193.20 kCal/kg, similar al PCS=9598 kCal/kg.

Considerando agua líquida en los productos de combustión se obtendrá su entalpía de combustión

Tomando datos de tabla A-25 entalpías de formación de Moran y Shapiro.

$$\bar{h}_{comb} = 34.6(-393520) + 12.295(-241820) + 6.3 * 10^{-3}(0) - [-103850](g) - [-126150](g)$$

$$\bar{h}_{comb} = -16358968.9 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}} (\text{combustible})$$

Tomando los carbonos e hidrógenos de cada combustible por separado se tiene

$$\text{Aceite: } 30\%[C_{76.6}H_{11.5}O_{11.4}]: 30\%(12 * 76.6 + 1 * 11.5) = 279.21$$

$$\text{Petróleo: } 70\%[C_{16.6}H_{30.2}O_{0.02}S_{0.009}]: 70\%(12 * 16.6 + 1 * 30.2) = 160.58$$

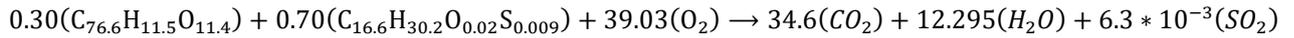
La entalpía de combustión considerando formación de agua líquida en los productos de combustión

$$\bar{h}_{comb} = \frac{-16358968.9}{279.21 + 160.58} = -37197.22 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = -8898.85 \frac{\text{kCal}}{\text{kg}}$$

$$\bar{h}_{comb} = -8898.85 \frac{\text{kCal}}{\text{kg}}$$

La entalpía de combustión considerando la formación de agua líquida en los productos de la combustión equivale a 8898.85 kCal/Kg, similar al PCI=8730.4 kCal/Kg.

Cálculo de temperatura de llama adiabática



Iterando mediante ecuaciones de las capacidades caloríficas de los productos de gases de combustión.

$$\Delta \bar{h}_T = \int_{298.15}^{T_{ad}} \left(\sum_{\text{productos}} n_i * C_{p_i} \right) dT$$

Donde el Cp tiene la forma siguiente

$$C_p = R(A + BT + CT^2 + DT^{-2})$$

Aplicando balance a reactantes y productos de la combustión en el calorímetro

$$\bar{h}_{\text{comb}} = \sum N_R (\bar{h}_f^0 + \bar{h} - \bar{h}_{298}^0)_R - N_P (\bar{h}_f^0 + \bar{h} - \bar{h}_{298}^0)_P$$

$$\begin{aligned} \bar{h}_{\text{comb}} = & 0.30[\bar{h}_{\text{C}_{76.6}\text{H}_{11.5}\text{O}_{11.4}}](g) + 0.70[\bar{h}_{\text{C}_{16.6}\text{H}_{30.2}\text{O}_{0.02}\text{S}_{0.009}}] + 39.03[\bar{h}_{(\text{O}_2)}] \\ & - [34.6(\bar{h}_{(\text{CO}_2)}) + 12.295(\bar{h}_{(\text{H}_2\text{O})}) + 6.3 * 10^{-3}(\bar{h}_{(\text{SO}_2)})] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{h}_{\text{comb}} = & 0.30 \left[\overline{(\bar{h}_f^0 + \Delta \bar{h})}_{\text{C}_{76.6}\text{H}_{11.5}\text{O}_{11.4}} \right] (l) + 0.70 \left[\overline{(\bar{h}_f^0 + \Delta \bar{h})}_{\text{C}_{16.6}\text{H}_{30.2}\text{O}_{0.02}\text{S}_{0.009}} \right] + 39.03 \left[\overline{(\bar{h}_f^0 + \Delta \bar{h})}_{(\text{O}_2)} \right] \\ & - \left[34.6 \left(\overline{(\bar{h}_f^0 + \Delta \bar{h})}_{(\text{CO}_2)} \right) + 12.295 \left(\overline{(\bar{h}_f^0 + \Delta \bar{h})}_{(\text{H}_2\text{O})} \right) + 6.3 * 10^{-3} \left(\overline{(\bar{h}_f^0 + \Delta \bar{h})}_{(\text{SO}_2)} \right) \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{h}_{\text{comb}} = & 0.30[-103850](g) + 0.70[-126150](l) + 39.03(0) \\ & - [34.6(-393520) + 12.295(-241820) + 6.3 * 10^{-3}(-29690)] \end{aligned}$$

$$\bar{h}_{\text{comb}} = 16469695.95 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}} (\text{combustible})$$

Reemplazando

$$C_{p_{\text{CO}_2}} = R(5.457 + 1.045 * 10^{-3}T - 1.157 * 10^5 T^{-2})$$

$$C_{p_{\text{H}_2\text{O}}} = R(3.47 + 1.45 * 10^{-3}T - 0.121 * 10^5 T^{-2})$$

$$C_{p_{\text{SO}_2}} = R(11.4 + 1.88 * 10^{-3}T - 1.84000 * 10^5 T^{-2})$$

$$\Delta \bar{h}_T = R \int_{298.15}^{T_{ad}} [34.6(5.457 + 1.045 * 10^{-3}T - 1.157 * 10^5 T^{-2}) + 12.295(3.47 + 1.45 * 10^{-3}T - 0.121 * 10^5 T^{-2}) + 6.3 * 10^{-3}(11.4 + 1.88 * 10^{-3}T - 1.84 * 10^5 T^{-2})]dT$$

Reduciendo términos semejantes se obtiene

$$\Delta \bar{h}_T = R \int_{298.15}^{T_{ad}} [231.547 + 0.068009594 (T) - 9190753.02(T)^{-2}]dT$$

Integrando se obtiene

$$\Delta \bar{h}_T = 231.547(T) + 0.034004797(T)^2 + \frac{9190753.02}{T}$$

$$\bar{h}_{comb} = 16469695.95 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}}$$

Mediante métodos numéricos, aplicamos método de Newton Raphson para evaluar la temperatura de llama adiabática en un polinomio de la forma siguiente.

$$T_{ad(n+1)} = T_{ad(n)} - \frac{f(T_{ad(n)})}{d(T_{ad(n)})}$$

$$16469695.95 = 231.547(T) + 0.034004797(T)^2 + \frac{9190753.02}{T}$$

$$f(T_{ad}) = 231.547(T) + 0.034004797(T)^2 + \frac{9190753.02}{T} - 16469695.95 \quad (**)$$

Derivando la expresión (**), se obtiene

$$\frac{d(f(T_{ad}))}{d(T_{ad})} = 231.547 + 0.068009594(T) - \frac{9190753.02}{T^2}$$

Dando forma a la siguiente expresión, según método de polinomio de Newton Raphson

$$T_{ad(n+1)} = T_{ad(n)} - \frac{f(T_{ad(n)})}{d(T_{ad(n)})}$$

Reemplazando

dando forma al polinomio para insertar datos (grado máximo y coeficientes del polinomio).

Resolver Ecuaciones Polinomiales por el Metodo Newton - Raphson

Grado de la Ecuación

Coeficiente 0 = Cx^0

Coeficiente 1 = Cx^1

Coeficiente 2 = Cx^2

Coeficiente 3 = Cx^3

Limpiar Valores

Valor raíz [Xo]

Iterar por Newton-Raphson

Resultado

No de Iteraciones

Puede consultar la tabla de las evaluaciones e iteraciones en la hoja de cálculo.

Fuente. Elaboración propia

La temperatura de llama adiabática es 3416.202 K

Tabla 14

Convergencia de temperatura de llama adiabática mezcla 30% AAR y 70% Petróleo industrial 500.

I	XI	F(Xn)	F'(Xn)	Xi- Xn
0	0.5	9190810.92	231.5980072	12826.67112
1	-26857.1553	-3.8856E+12	302928424.3	8539.104101
2	-18318.0512	-1.1505E+12	134729958.5	5674.069812
3	-12643.9814	-3.4033E+11	59979082.18	3753.260369
4	-8890.72102	-1.0045E+11	26762783.6	2454.834225
5	-6435.88679	-2.9483E+10	12010199.24	1559.227727
6	-4876.65907	-8529883029	5470581.931	914.3528527
7	-3962.30621	-2371667521	2593820.88	428.4653486
8	-3533.84087	-586271377	1368305.229	110.3282723
9	-3423.51259	-100555097	911417.3069	7.27946694
10	-3416.23313	-5866512.55	805898.6464	0.03093142
11	-3416.2022	-24717.6441	799111.1915	5.57303E-07
12	-3416.20219	-0.44533136	799082.3968	

Estequiometría de reacción de combustión en bomba calorimétrica para 40% aceite ácido y 60% petróleo industrial 500 puro



Haciendo el balance

$$\begin{aligned} \text{Carbono} & : & 0.40(76.6) + 0.60(16.6) = B \rightarrow B = 40.6 \\ \text{Hidrógeno} & : & 0.40(11.5) + 0.60(30.2) = 2D \rightarrow D = 11.36 \\ \text{Oxígeno} & : & 0.40(11.4) + 0.60(0.02) + 2A = 2B + D + 2E \quad (a) \\ \text{Azufre} & : & 0.60(0.009) = E \end{aligned}$$

Reemplazando en (a):

$$0.40(11.4) + 0.60(0.02) + 2A = 2(40.6) + 11.36 + 0.0108$$

$$A = 43.99$$

Reconstruyendo la reacción

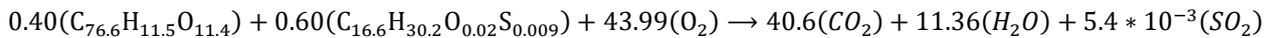


Cálculo de la relación Oxígeno /Combustible en la reacción

$$R_{\text{Oxígeno}/\text{Comb}} = \frac{2 * 43.99 * 16}{0.4[12 * 76.6 + 1 * 11.5 + 16 * 11.4] + 0.6[12 * 16.6 + 1 * 30.2 + 16 * 0.02 + 32 * 0.009]}$$

$$R_{\text{Oxígeno}/\text{Comb}} = 2.724$$

Calculando su entalpía de combustión



$$\bar{h}_{comb} = \sum N_P \left(\bar{h}_f^0 + \bar{h} - \bar{h}_{298}^0 \right)_P - \sum N_R \left(\bar{h}_f^0 + \bar{h} - \bar{h}_{298}^0 \right)_R$$

Reemplazando se tiene $\Delta \bar{h} = \bar{h} - \bar{h}_{298}^0$

$$\begin{aligned} \bar{h}_{comb} = & 40.6(\bar{h}_{CO_2}) + 11.36(\bar{h}_{H_2O}) + 5.4 * 10^{-3}(\bar{h}_{SO_2}) - [\bar{h}_{0.40(C_{76.6}H_{11.5}O_{11.4})}](g) - [\bar{h}_{0.60(C_{16.6}H_{30.2}O_{0.02}S_{0.009})}](g) \\ & - \bar{h}_{43.99(O_2)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{h}_{comb} = & 40.6 \left(\bar{h}_f^0 + \Delta \bar{h} \right)_{CO_2} + 11.36 \left(\bar{h}_f^0 + \Delta \bar{h} \right)_{H_2O} + 5.4 * 10^{-3} \left(\bar{h}_f^0 + \Delta \bar{h} \right)_{SO_2} \\ & - \left[\left(\bar{h}_f^0 + \Delta \bar{h} \right)_{[0.40(C_{76.6}H_{11.5}O_{11.4})](g)} \right] (g) \\ & - \left[\left(\bar{h}_f^0 + \Delta \bar{h} \right)_{[0.60(C_{16.6}H_{30.2}O_{0.02}S_{0.009})](g)} \right] - \left(\bar{h}_f^0 + \Delta \bar{h} \right)_{43.99(O_2)} \end{aligned}$$

Considerando agua líquida en los productos de combustión se obtendrá su entalpia de combustión.

Tomando datos de tabla A-25 entalpias de formación de Moran y Shapiro.

$$\bar{h}_{comb} = 40.6(-393520) + 11.36(-285830) + 5.4 * 10^{-3}(0) - [-103850](g) - [-126150](g)$$

$$\bar{h}_{comb} = -18993940.8 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}} (\text{combustible})$$

Tomando los carbonos e hidrógenos de cada combustible por separado se tiene

$$\text{Aceite: } 40\%[C_{76.6}H_{11.5}O_{11.4}]: 40\%(12 * 76.6 + 1 * 11.5) = 372.28$$

$$\text{Petróleo: } 60\%[C_{16.6}H_{30.2}O_{0.02}S_{0.009}]: 60\%(12 * 16.6 + 1 * 30.2) = 137.64$$

$$\bar{h}_{comb} = \frac{-18993940.8 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}}}{(372.28 + 137.64) \frac{\text{kg Comb}}{\text{kmol Comb}}} = -37248.864 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = -8911.21 \frac{\text{kCal}}{\text{kg}}$$

$$\bar{h}_{comb} = -8911.21 \frac{\text{kCal}}{\text{kg}}$$

La entalpia de combustión considerando la formación de vapor de agua en los productos de la combustión equivale a 8911.21 kCal/Kg, similar al PCS=8086 kCal/Kg.

Considerando agua líquida en los productos de combustión se obtendrá su entalpia de combustión

Tomando datos de tabla A-25 entalpias de formación de Moran y Shapiro.

$$\bar{h}_{comb} = 40.6(-393520) + 11.36(-241820) + 5.4 * 10^{-3}(0) - [-103850](g) - [-126150](g)$$

$$\bar{h}_{comb} = -18493987.2 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}} (\text{combustible})$$

Tomando los carbonos e hidrógenos de cada combustible por separado se tiene

$$\text{Aceite: } 40\%[C_{76.6}H_{11.5}O_{11.4}]: 40\%(12 * 76.6 + 1 * 11.5) = 372.28$$

$$\text{Petróleo: } 60\%[C_{16.6}H_{30.2}O_{0.02}S_{0.009}]: 60\%(12 * 16.6 + 1 * 30.2) = 137.64$$

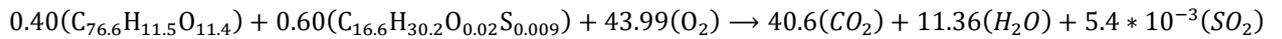
La entalpía de combustión considerando formación de agua líquida en los productos de combustión

$$\bar{h}_{comb} = \frac{-18493987.2}{372.28 + 137.64} = -36268.40 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = -8676.65 \frac{\text{kCal}}{\text{kg}}$$

$$\bar{h}_{comb} = -8898.85 \frac{\text{kCal}}{\text{kg}}$$

La entalpía de combustión considerando la formación de agua líquida en los productos de la combustión equivale a 8898.85 k Cal/Kg, similar al PCI=7220.3 kCal/Kg.

Cálculo de temperatura de llama adiabática



Iterando mediante ecuaciones de las capacidades caloríficas de los productos de gases de combustión.

$$\Delta \bar{h}_T = \int_{298.15}^{T_{ad}} \left(\sum_{\text{productos}} n_i * C_{p_i} \right) dT$$

Donde el Cp tiene la forma siguiente

$$C_p = R(A + BT + CT^2 + DT^{-2})$$

Aplicando balance a reactantes y productos de la combustión en el calorímetro

$$\bar{h}_{comb} = \sum N_R (\bar{h}_f^0 + \bar{h} - \bar{h}_{298}^0)_R - N_P (\bar{h}_f^0 + \bar{h} - \bar{h}_{298}^0)_P$$

$$\bar{h}_{comb} = 0.40[\bar{h}_{\text{C}_{76.6}\text{H}_{11.5}\text{O}_{11.4}}](g) + 0.60[\bar{h}_{\text{C}_{16.6}\text{H}_{30.2}\text{O}_{0.02}\text{S}_{0.009}}] + 43.99[\bar{h}_{(\text{O}_2)}]$$

$$- [40.6(\bar{h}_{(\text{CO}_2)}) + 11.36(\bar{h}_{(\text{H}_2\text{O})}) + 5.4 * 10^{-3}(\bar{h}_{(\text{SO}_2)})]$$

$$\bar{h}_{comb} = 0.40 \left[(\bar{h}_f^0 + \Delta \bar{h})_{\text{C}_{76.6}\text{H}_{11.5}\text{O}_{11.4}} \right] (l) + 0.60 \left[(\bar{h}_f^0 + \Delta \bar{h})_{\text{C}_{16.6}\text{H}_{30.2}\text{O}_{0.02}\text{S}_{0.009}} \right] + 43.99 \left[(\bar{h}_f^0 + \Delta \bar{h})_{(\text{O}_2)} \right]$$

$$- \left[34.6 \left((\bar{h}_f^0 + \Delta \bar{h})_{(\text{CO}_2)} \right) + 12.295 \left((\bar{h}_f^0 + \Delta \bar{h})_{(\text{H}_2\text{O})} \right) + 6.3 * 10^{-3} \left((\bar{h}_f^0 + \Delta \bar{h})_{(\text{SO}_2)} \right) \right]$$

$$\bar{h}_{comb} = 0.40[-103850](g) + 0.60[-126150](l) + 39.03(0)$$

$$- [40.6(-393520) + 11.36(-241820) + 5.4 * 10^{-3}(-29690)]$$

$$\bar{h}_{comb} = 18604687.53 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}} (\text{combustible})$$

Reemplazando

$$C_{p_{\text{CO}_2}} = R(5.457 + 1.045 * 10^{-3}T - 1.157 * 10^5 T^{-2})$$

$$C_{p_{H_2O}} = R(3.47 + 1.45 * 10^{-3}T - 0.121 * 10^5 T^{-2})$$

$$C_{p_{SO_2}} = R(11.4 + 1.88 * 10^{-3}T - 1.84000 * 10^5 T^{-2})$$

$$\Delta \bar{h}_T = R \int_{298.15}^{T_{ad}} [40.6(5.457 + 1.045 * 10^{-3}T - 1.157 * 10^5 T^{-2}) + 11.36(3.47 + 1.45 * 10^{-3}T - 0.121 * 10^5 T^{-2}) + 5.4 * 10^{-3}(11.4 + 1.88 * 10^{-3}T - 1.84 * 10^5 T^{-2})]dT$$

Reduciendo términos semejantes se obtiene

$$\Delta \bar{h}_T = R \int_{298.15}^{T_{ad}} [223.9808 + 0.058909152 (T) - 4835869.6(T)^{-2}]dT$$

Integrando se obtiene

$$\Delta \bar{h}_T = 223.9808(T) + 0.029454576(T)^2 + \frac{4835869.6}{T}$$

$$\bar{h}_{comb} = 18604687.53 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}}$$

Mediante métodos numéricos, aplicamos método de Newton Raphson para evaluar la temperatura de llama adiabática en un polinomio de la forma siguiente.

$$T_{ad(n+1)} = T_{ad(n)} - \frac{f(T_{ad(n)})}{d(T_{ad(n)})}$$

$$18604687.53 = 223.9808(T) + 0.029454576(T)^2 + \frac{4835869.6}{T}$$

$$f(T_{ad}) = 223.9808(T) + 0.029454576(T)^2 + \frac{4835869.6}{T} - 18604687.53 \quad (**)$$

Derivando la expresión (**), se obtiene

$$\frac{d(f(T_{ad}))}{d(T_{ad})} = 223.9808 + 0.058909152(T) - \frac{4835869.6}{T^2}$$

Dando forma a la siguiente expresión, según método de polinomio de Newton Raphson

$$T_{ad(n+1)} = T_{ad(n)} - \frac{f(T_{ad(n)})}{d(T_{ad(n)})}$$

Resolver Ecuaciones Polinomiales por el Metodo Newton - Raphson

Grado de la Ecuación	<input type="text" value="3"/>	<input type="button" value="Limpiar Valores"/>	<input type="button" value="Iterar por Newton-Raphson"/>	
Coefficiente 0 = Cx^0	<input type="text" value="4835869.6"/>	Valor raíz [Xo]	<input type="text" value="0.5"/>	Resultado
Coefficiente 1 = Cx^1	<input type="text" value="0"/>			<input type="text" value="-3807.80092113119"/>
Coefficiente 2 = Cx^2	<input type="text" value="223.9808"/>			No de Iteraciones
Coefficiente 3 = Cx^3	<input type="text" value="0.058909152"/>			<input type="text" value="11"/>

Puede consultar la tabla de las evaluaciones e iteraciones en la hoja de cálculo.

Estequiometría de reacción de combustión en bomba calorimétrica para 50% Aceite ácido y 50% Petróleo industrial 500 puro.



Haciendo el balance

$$\text{Carbono} \quad : \quad 0.50(76.6) + 0.50(16.6) = B \rightarrow B = 46.6$$

$$\text{Hidrógeno} \quad : \quad 0.50(11.5) + 0.50(30.2) = 2D \rightarrow D = 10.42$$

$$\text{Oxígeno} \quad : \quad 0.50(11.4) + 0.50(0.02) + 2A = 2B + D + 2E \quad (a)$$

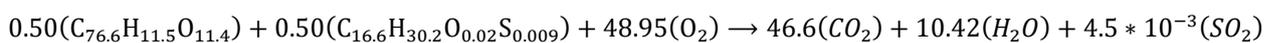
$$\text{Azufre} \quad : \quad 0.50(0.009) = E$$

Reemplazando en (a):

$$0.50(11.4) + 0.50(0.02) + 2A = 2(46.6) + 10.42 + 0.009$$

$$A = 48.95$$

Reconstruyendo la reacción

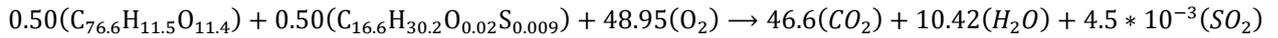


Cálculo de la relación Oxígeno /Combustible en la reacción

$$R_{\text{Oxígeno}/\text{Comb}} = \frac{2 * 48.95 * 16}{0.5[12 * 76.6 + 1 * 11.5 + 16 * 11.4] + 0.5[12 * 16.6 + 1 * 30.2 + 16 * 0.02 + 32 * 0.009]}$$

$$R_{\text{Oxígeno}/\text{Comb}} = 2.33$$

Calculando su entalpía de combustión



$$\bar{h}_{comb} = \sum N_P (\bar{h}_f^0 + \bar{h} - \bar{h}_{298}^0)_p - \sum N_R (\bar{h}_f^0 + \bar{h} - \bar{h}_{298}^0)_R$$

Reemplazando se tiene $\Delta\bar{h} = \bar{h} - \bar{h}_{298}^0$

$$\bar{h}_{comb} = 46.6(\bar{h}_{CO_2}) + 10.42(\bar{h}_{H_2O}) + 4.5 * 10^{-3}(\bar{h}_{SO_2}) - [\bar{h}_{0.50(C_{76.6}H_{11.5}O_{11.4})}(g)] - [\bar{h}_{0.50(C_{16.6}H_{30.2}O_{0.02}S_{0.009})}(g)] - \bar{h}_{48.95(O_2)}$$

$$\bar{h}_{comb} = 46.6(\bar{h}_f^0 + \Delta\bar{h})_{CO_2} + 10.42(\bar{h}_f^0 + \Delta\bar{h})_{H_2O} + 4.5 * 10^{-3}(\bar{h}_f^0 + \Delta\bar{h})_{SO_2} - \left[(\bar{h}_f^0 + \Delta\bar{h})_{[0.50(C_{76.6}H_{11.5}O_{11.4})](g)} \right] (g) - \left[(\bar{h}_f^0 + \Delta\bar{h})_{[0.50(C_{16.6}H_{30.2}O_{0.02}S_{0.009})](g)} \right] - (\bar{h}_f^0 + \Delta\bar{h})_{48.95(O_2)}$$

Considerando agua líquida en los productos de combustión se obtendrá su entalpía de combustión.

Tomando datos de tabla A-25 entalpías de formación de Moran y Shapiro.

$$\bar{h}_{comb} = 46.6(-393520) + 10.42(-285830) + 4.5 * 10^{-3}(0) - [-103850](g) - [-126150](g)$$

$$\bar{h}_{comb} = -21086380.6 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}} (\text{combustible})$$

Tomando los carbonos e hidrógenos de cada combustible por separado se tiene

$$\text{Aceite: } 50\%[C_{76.6}H_{11.5}O_{11.4}]: 50\%(12 * 76.6 + 1 * 11.5) = 465.35$$

$$\text{Petróleo: } 50\%[C_{16.6}H_{30.2}O_{0.02}S_{0.009}]: 50\%(12 * 16.6 + 1 * 30.2) = 114.7$$

$$\bar{h}_{comb} = \frac{-21086380.6 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}}}{(465.35 + 114.7) \frac{\text{kg Comb}}{\text{kmol Comb}}} = -36352.69 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = -8696.81 \frac{\text{kCal}}{\text{kg}}$$

$$\bar{h}_{comb} = -8696.81 \frac{\text{kCal}}{\text{kg}}$$

La entalpía de combustión considerando la formación de vapor de agua en los productos de la combustión equivale a 8696.81 kCal/Kg, similar al PCS=6952 kCal/Kg.

Considerando agua líquida en los productos de combustión se obtendrá su entalpía de combustión

Tomando datos de tabla A-25 entalpías de formación de Moran y Shapiro.

$$\bar{h}_{comb} = 46.6(-393520) + 10.42(-241820) + 4.5 * 10^{-3}(0) - [-103850](g) - [-126150](g)$$

$$\bar{h}_{comb} = -20627796.4 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}} (\text{combustible})$$

Tomando los carbonos e hidrógenos de cada combustible por separado se tiene

$$\text{Aceite: } 50\%[C_{76.6}H_{11.5}O_{11.4}]: 50\%(12 * 76.6 + 1 * 11.5) = 465.35$$

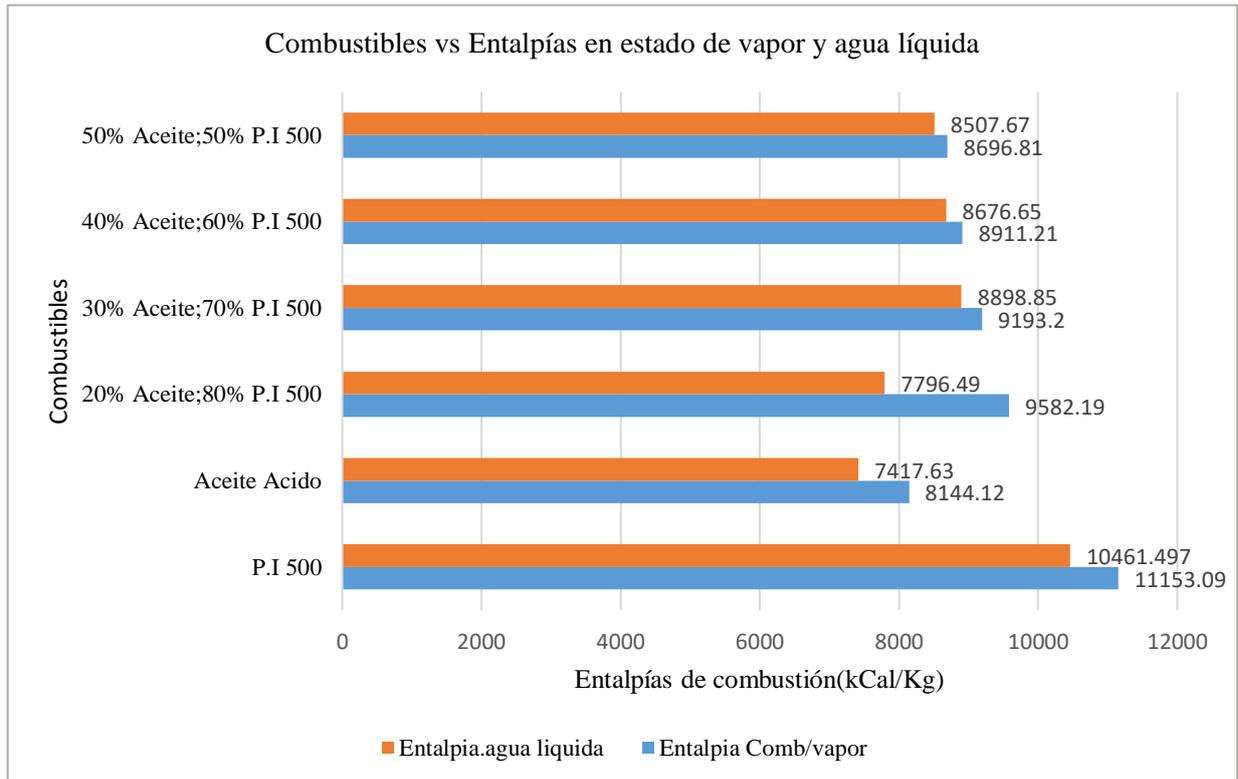
$$\text{Petróleo: } 50\%[C_{16.6}H_{30.2}O_{0.02}S_{0.009}]: 50\%(12 * 16.6 + 1 * 30.2) = 114.7$$

La entalpía de combustión considerando formación de agua líquida en los productos de combustión

$$\bar{h}_{comb} = \frac{-20627796.4}{465.35 + 114.7} = -35562.100 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = -8507.679 \frac{\text{kCal}}{\text{kg}}$$

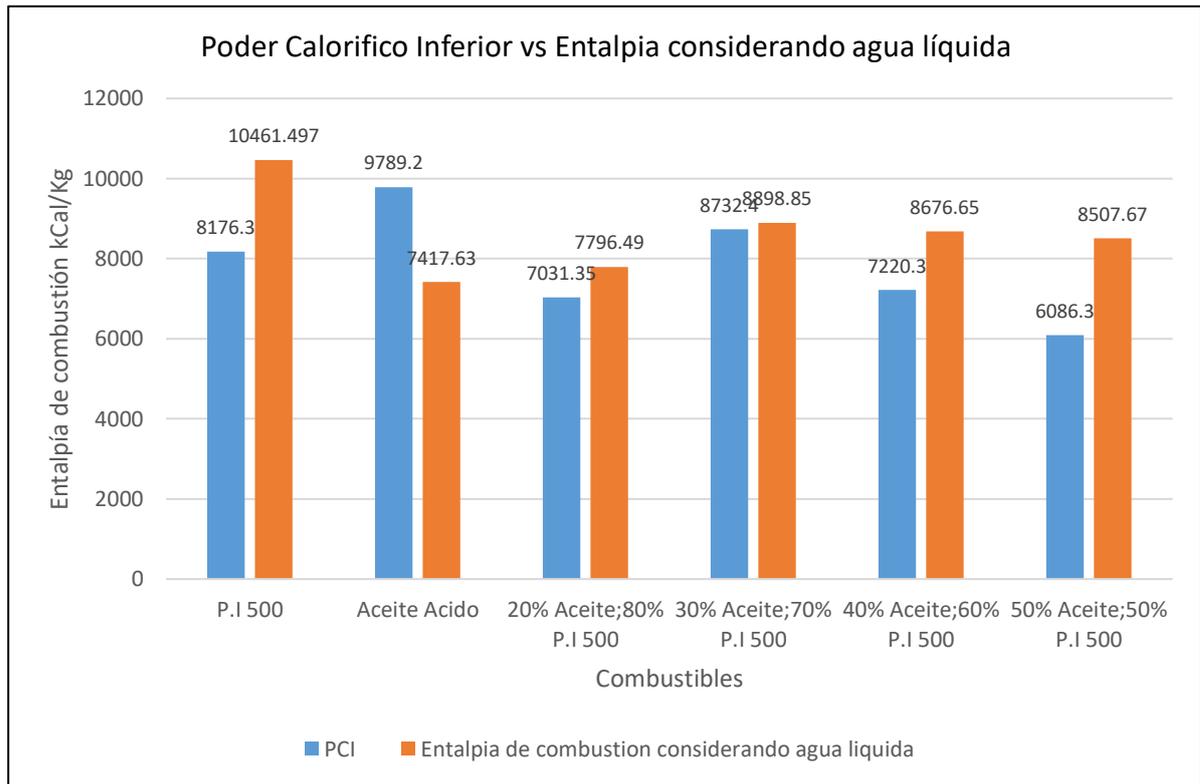
$$\bar{h}_{comb} = -8507.679 \frac{\text{kCal}}{\text{kg}}$$

La entalpía de combustión considerando la formación de agua líquida en los productos de la combustión equivale a 8507.679 kCal/Kg, similar al PCI=6086 kCal/Kg.



Gráfica 11. Entalpías de combustión considerando agua en fase de vapor y líquida.

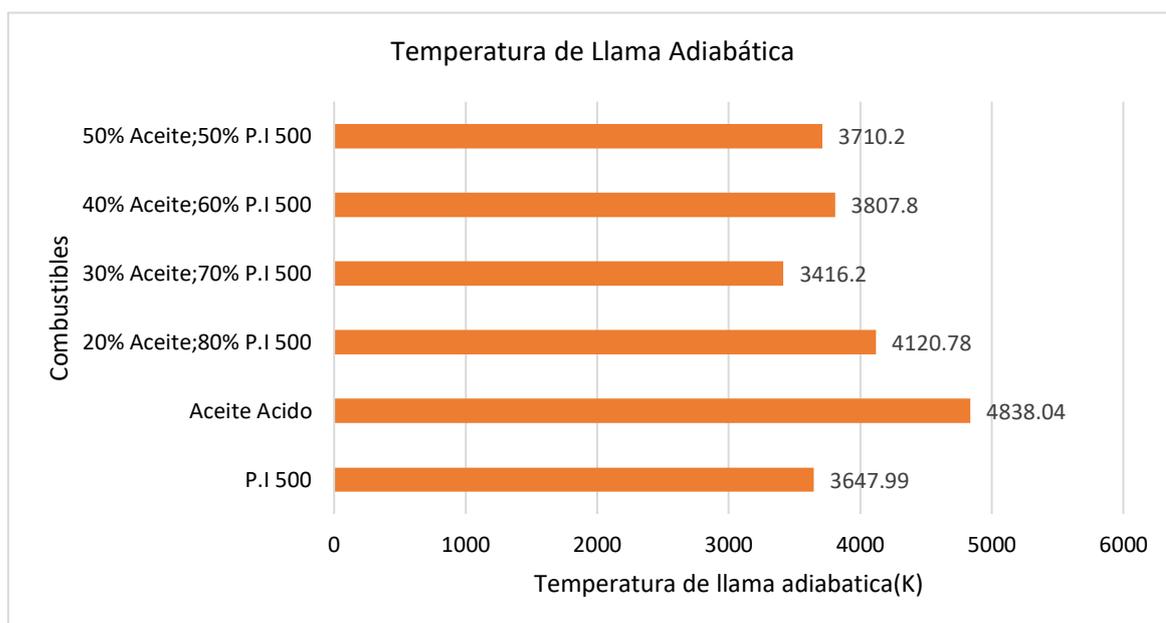
De la gráfica 11, obtenemos información respecto al valor de las entalpías de combustión que se obtienen para cada combustible puro y mezclado, estos valores se aproximan a los encontrados mediante el método calorimétrico sin embargo sus resultados son muy importantes porque muestra una aproximación muy cercana obtenida por ambos métodos, a continuación, se realiza las comparaciones.



Gráfica 12. Comparación del PCI obtenido mediante ecuaciones y Entalpía de combustión.

De la gráfica 12, obtenemos información que compara los dos métodos de cálculo la primera usando ecuaciones de calorimetría y la segunda forma usando balance estequiométrico y entalpías de combustión, sin embargo, estos parámetros sirven para conocer un valor promedio estándar sobre el cual oscila el valor de la entalpía al combustionar mezclas combustibles.

Variación de la temperatura de llama adiabática



Gráfica 13. Temperatura de llama adiabática de los combustibles

De la gráfica 13, deducimos que el aceite ácido residual puro desarrolla una temperatura de llama adiabática muy elevada, esta magnitud puede asociarse a que la combustión se considera teórica o sin intercambio de masa ni energía con el medio circundante, sin embargo en los cálculos de balance se sabe que la oxidación se realiza con oxígeno puro y en una cantidad de masa de 1 gramo de muestra de aceite ácido residual y por tener una masa muy reducida la combustión es muy eficiente, los valores encontrados son referenciales por cuanto el valor real de la temperatura de proceso o en cámara de combustión es aproximadamente un 70% de cada valor que hemos obtenido.

Para la mezcla elegida en estudio 30% de aceite ácido residual y 70% de petróleo industrial 500, obtenemos un valor de 3416.2 K un valor elevado y aceptable. Es importante indicar que las tablas de entalpías para ciertos compuestos presentan valor máximos hasta temperaturas de 3803 K por lo que fue necesario usar un método de iteración cuyo resultado permitiera la convergencia de una solución analítica que se propuso mediante el método de Newton Raphson y las correlaciones de calores específicos en función a la temperatura y el grado de la ecuación polinómica, actualmente no se tiene data sobre ecuaciones validadas formalmente para mezclas combustibles asimismo las ecuaciones de C_p están restringidas por temperaturas y por especies de combustión mas no para mezclas, un estudio experimental y teórico puede plantear correlaciones cuyas aproximaciones detallen mayor precisión para balances atípicos.

4.6 COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL ACEITE DE PESCADO

Información referida del ingeniero Víctor Arroyo Chalco (Setiembre, 2008), en el seminario de capacitación "Eficiencia energética y administración de la demanda en el sector productivo", fuente original, en su pág. 09

Tabla 15

Dato de combustibles líquidos

Propiedad	PR-6	Diesel-2	Aceite de pescado
API@60 °F	15.2	33.5	20.1
Viscosidad@ 100 °F(SSU)		42	155
Viscosidad@ 100 °F(cSt)	615		
Punto de inflamación(°C)	105		284
PCS(kCal/gal)	38052	35163	33400
C(%)	86	87.13	76.6
H(%)	11	12.6	11.5
O(%)	1	0.04	11.4
N(%)	0.2	0.006	
S(%)	1	0.22	
Agua(%)	0.8	0	0.5

Fuente: Arroyo Chalco., V (2008) "Eficiencia energética y administración de la demanda en el sector productivo".

Tabla 16

Composición de petróleo industrial N° 500

Propiedad	Petróleo Industrial 500
API@60 °F	
Viscosidad@ 100 °F(SSU)	
Viscosidad@ 100 °F(cSt)	
Punto de inflamación(°C)	
PCS(kCal/gal)	
C(%)	16.6
H(%)	30.2
O(%)	0.02
N(%)	
S(%)	0.009
Agua (%)	

Fuente: Ficha técnica de combustible petróleo industrial 500, Petroperú, 2018

A continuación, se establece la composición química del aceite de pescado (Anchoveta), como combustible en % en peso.

Tabla 17

Resumen de los combustibles reactantes (aceite residual de pescado y P.I.N° 500

Componentes	Composición Aceite de pescado	Peso 100 Kg	N° moles	Composición Petróleo Residual 500	Peso 100 Kg	N° moles
C	76.6 %	76.6	6.38	86.8 %	86.8 Kg	7.23
H	11.5 %	11.5	5.75	10.2 %	1.6 Kg	5.1
O	11.4 %	11.4	0.35625	0.5 %	0.5 Kg	0.015
N	-	-			-	
S	-	-		1.6 %	-	0.05
Agua	0.5 %	0.5	0.0277	0.5 %	-	0.0277

Fuente. Elaboración propia

4.7 COMPOSICIÓN DE LOS GASES DE COMBUSTIÓN A 30% ACEITE Y 70% DE PETRÓLEO INDUSTRIAL 500

Tabla 18

Composición de gases de combustión 30% aceite y 70% petróleo

Parámetro medido	Símbolo	Valor	Unidad
Eficiencia de gas		87.9	%
Oxígeno	O ₂	5.21	%
Dióxido de Carbono	CO ₂	12.55	%
Exceso d aire	EA	31.2	%
Temperatura de gases	T _s	204.9	°C
Temperatura de ambiente	T _a	32.8	°C
Monóxido de carbono	CO	116	ppm
Dióxido de azufre	SO ₂	784	ppm
Óxido Nítrico	NO	208	ppm
Óxido de nitrógeno	NO _x	218	ppm
Presión de bomba de petróleo		85	psi
Presión petróleo al quemador		65	psi
Temperatura de mezcla combustible		115	°C

Fuente. Área de mantenimiento industrial.

Estos valores permitirán identificar los porcentajes de CO₂, CO, N₂, H₂O, SO_x, y cenizas, a diversas proporciones de mezclas de aceite ácido de pescado y petróleo industrial N ° 500 además de identificar el exceso de aire para cada caso se medirán las temperaturas en los puntos de mediciones de la caldera considerándose los siguientes aspectos.

Mediciones de temperaturas en el caldero pirotubular 900 BHP

Temperatura en la tapa delantera (zona del quemador)	49°C
Temperatura al costado, lado derecho.	41°C
Temperatura al costado, lado izquierdo.	42.5°C
Temperatura de la parte trasera del caldero (zona refractaria)	48°C
Temperatura de gases de chimenea	204.9 °C
Temperatura de llama adiabática	x°C
Temperatura promedio de cámara de combustión	y °C

Mediciones de flujo

Velocidad del aire en sala de calderas	0.5 m/s
Velocidad de salida de gases por chimenea	10.2 m/s

4.8 DETERMINACIÓN DEL EXCESO DE AIRE Y EFICIENCIA TÉRMICA

A partir del exceso de aire medido con el analizador para la proporción de mezcla de 30% de aceite y 70% de petróleo industrial N° 500, se evaluará teóricamente los excesos de aire en porcentajes inferiores y superiores del valor que el analizador mida a fin de realizar ajustes de combustión para garantiza la oxidación completa del aceite ácido residual.

Tabla 19

Registro de exceso de aire medido con analizador al 30% de A.A.R y 70% de P.I. N° 500.

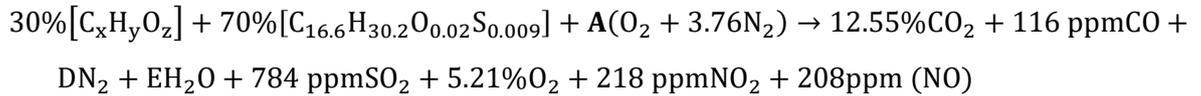
Proporción de mezcla	Exceso de aire medido(%)	Eficiencia de combustión (η)
30% aceite ácido y 70% petróleo industrial N° 500	31.2	87.9

Fuente. Dato obtenido de lectura de analizador de gases

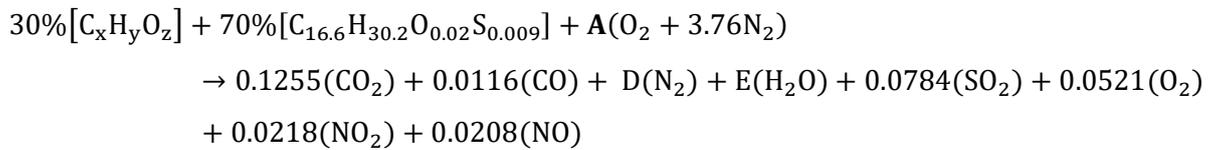
4.9 ANÁLISIS DEL EXCESO DE AIRE

Mezcla 30% aceite ácido residual y 70% petróleo industrial 500

El exceso de aire se determinó con el analizador de gases, conociéndose la composición del Petróleo residual 500: $C_{16.6}H_{30.2}O_{0.02}S_{0.009}$



Uniformizando las unidades:



DEL BALANCE SE OBTIENEN LOS COEFICIENTES

Carbono

$$30\%(x) + 70\%(a) = 0,1255(1) + 0,0116(1) \rightarrow x + 4a = 0,6855$$

Hidrógeno

$$30\%(y) + 70\%(b) = 2(E) \rightarrow y + 4b = 10E$$

Oxígeno

$$30\%(z) + 80\%(c) + 1,312(2) = 0,1255(2) + 0,0116(1) + E + 2(0,0784) + 2(0,0521) + 2(0,0218) + 0,0208$$

$$z + 4c + 10,18 = 5E$$

Azufre:

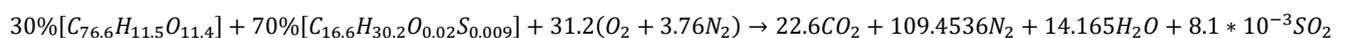
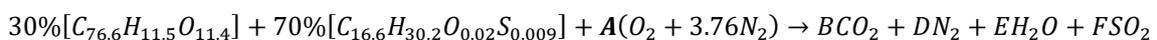
$$70\%(d) = 2(0,0784) \rightarrow d = 0,196$$

Nitrógeno

$$2(3,76)(1,312) = 2(D) + 0,0218$$

$$9,866 = 2(D) + 0,0218 + 0,0208 \rightarrow D = 4,9117$$

donde



-Determinación de la temperatura de llama adiabática

Temperatura de precalentamiento de mezcla combustible: 115°C

Temperatura de aire de combustión: 20°C

$$\sum (nh)_{React} = \sum (nh)_{Prod}$$

$$\begin{aligned} & (h_f + \Delta h)_{\{10\%[C_{76.6}H_{11.5}O_{11.4}] + 90\%[C_{16.6}H_{30.2}O_{0.02}S_{0.009}]\}} + 29.11(\bar{h}_f + \Delta h)_{O_2} + 109.4536(\bar{h}_f + \Delta h)_{N_2} \\ & = 22.6(\bar{h}_f + \Delta h)_{CO_2} + 14.165(\bar{h}_f + \Delta h)_{H_2O} + 109.4536(\bar{h}_f + \Delta h)_{N_2} + 8.1 * 10^{-3}(\bar{h}_f + \Delta h)_{SO_2} \end{aligned}$$

Reduciendo términos se tendrá

$$\begin{aligned} & (h_f)_{\{20\%[C_{76.6}H_{11.5}O_{11.4}] + 80\%[C_{16.6}H_{30.2}O_{0.02}S_{0.009}]\}} + C_p(\Delta T) + 29.11(\Delta h)_{O_2} + 109.4536(\Delta h)_{N_2} = \\ & = 22.6(\bar{h}_f + \Delta h)_{CO_2} + 14.165(\bar{h}_f + \Delta h)_{H_2O} + 109.4536(\bar{h}_f + \Delta h)_{N_2} + 8.1 * 10^{-3}(\bar{h}_f + \Delta h)_{SO_2} \end{aligned}$$

Se tiene:

Para el aire a condiciones estándar de 25°C y 1 atm de presión ambiental.

$$\Delta h_{O_2} = 0 ; \Delta h_{N_2} = 0$$

Para los compuestos de productos de combustión

- $(h_f)_{\{30\%[C_{76.6}H_{11.5}O_{11.4}] + 70\%[C_{16.6}H_{30.2}O_{0.02}S_{0.009}]\}}$: Entalpía de formación de la mezcla combustible.
- $h_{f_{N_2}}$: 0
- $h_{f_{CO_2}}$: Se determinará por interpolación a T: 115°C
- $h_{f_{H_2O}}$: Se determinará por interpolación a T: 115°C
- $h_{f_{SO_2}}$: Se determinará por interpolación a T: 115°C

Realizando interpolaciones para las entalpías de $h_{f_{CO_2}}, h_{f_{H_2O}}, h_{f_{SO_2}}$, a=(273+115)=388 K

Tabla 20
Interpolación de entalpías.

T(K)	CO ₂	H ₂ O	SO ₂
300	69	62	
388	h_{fCO_2}	h_{fH_2O}	$296000 \frac{\text{kJ}}{\text{Kmol}}$
400	4003	3450	

Fuente. Elaboración propia

$$\frac{388-300}{400-300} = \frac{h_{fCO_2}-69}{4003-69} \rightarrow h_{fCO_2} = 3530.92 \frac{\text{kJ}}{\text{Kmol}} \quad ; \quad \frac{388-300}{400-300} = \frac{h_{fH_2O}-62}{4003-62} \rightarrow h_{fH_2O} = 3043.44 \frac{\text{kJ}}{\text{Kmol}}$$

Reemplazando en (05)

$$\begin{aligned} &= 22.6(\bar{h}_f + \Delta h)_{CO_2} + 14.165(\bar{h}_f + \Delta h)_{H_2O} + 109.4536(\bar{h}_f + \Delta h)_{N_2} + 8.1 * 10^{-3}(\bar{h}_f + \Delta h)_{SO_2} = \\ &(h_f)_{\{30\%[C_{76.6}H_{11.5}O_{11.4}] + 70\%[C_{16.6}H_{30.2}O_{0.02}S_{0.009}]\}} + C_p(\Delta T) + 29.11(\Delta h)_{O_2} + 109.4536(\Delta h)_{N_2} \\ &= 22.6(\bar{h}_f + \Delta h)_{CO_2} + 14.165(\bar{h}_f + \Delta h)_{H_2O} + 109.4536(\bar{h}_f + \Delta h)_{N_2} + 8.1 * 10^{-3}(\bar{h}_f + \Delta h)_{SO_2} = \\ &(h_f)_{\{30\%[C_{76.6}H_{11.5}O_{11.4}] + 70\%[C_{16.6}H_{30.2}O_{0.02}S_{0.009}]\}} + C_p(\Delta T) + 29.11(\mathbf{0})_{O_2} + 109.4536(\mathbf{0})_{N_2} \\ &= 22.6(\Delta h)_{CO_2} + 14.165(\Delta h)_{H_2O} + 109.4536(\Delta h)_{N_2} + 8.1 * 10^{-3}(\Delta h)_{SO_2} \\ &= (h_f)_{\{30\%[C_{76.6}H_{11.5}O_{11.4}] + 70\%[C_{16.6}H_{30.2}O_{0.02}S_{0.009}]\}} + C_p(\Delta T) \end{aligned}$$

Calculando las entalpías de formación de la mezcla combustible

$$\Delta h = \sum (n\bar{h}_f)_{Prod} - \sum (n\dot{h}_f)_{Reac}$$

Del experimento de laboratorio se determinó que: 30% Aceite y 70% R-500

PCS: 9598 kCal/Kg=40119,64 kJKg

PCI: 8732,4 kCal/Kg= 36501.432 kJ/Kg

Reemplazando y ordenando términos se tiene:

$$\begin{aligned} -42075.88 &= 22.6(\Delta h)_{CO_2} + 14.165(\Delta h)_{H_2O} + 109.4536(\Delta h)_{N_2} + 8.1 * 10^{-3}(\Delta h)_{SO_2} \\ &- (h_f)_{\{30\%[C_{76.6}H_{11.5}O_{11.4}] + 70\%[C_{16.6}H_{30.2}O_{0.02}S_{0.009}]\}} \end{aligned}$$

$$(h_f)_{\{30\%[C_{76.6}H_{11.5}O_{11.4}] + 70\%[C_{16.6}H_{30.2}O_{0.02}S_{0.009}]\}}$$

$$= 22.6(\Delta h)_{CO_2} + 14.165(\Delta h)_{H_2O} + 109.4536(\Delta h)_{N_2} + 8.1 * 10^{-3}(\Delta h)_{SO_2} + 40119,64$$

$$(h_f)_{\{30\%[C_{76.6}H_{11.5}O_{11.4}] + 70\%[C_{16.6}H_{30.2}O_{0.02}S_{0.009}]\}}$$

$$= 22.6 \left(-3530.92 \frac{\text{kJ}}{\text{Kmol}} \right)_{CO_2} + 14.165 \left(-3043.44 \frac{\text{kJ}}{\text{Kmol}} \right)_{H_2O} + 109.4536(0)_{N_2} + 8.1$$

$$* 10^{-3}(-296900)_{SO_2} + 40119.4 \frac{\text{kJ}}{\text{Kg}} * 1342.78 \frac{\text{Kg}}{\text{Kmol}}$$

$$(h_f)_{\{30\%[C_{76.6}H_{11.5}O_{11.4}] + 70\%[C_{16.6}H_{30.2}O_{0.02}S_{0.009}]\}} = -563736.74 \frac{\text{kJ}}{\text{Kmol}}$$

Reemplazando en la ecuación anterior

$$22.6(\Delta h)_{CO_2} + 14.165(\Delta h)_{H_2O} + 109.4536(\Delta h)_{N_2} + 8.1 * 10^{-3}(\Delta h)_{SO_2}$$

$$= 563736.74 \frac{\text{kJ}}{\text{Kmol}} + 1,960 \frac{\text{kJ}}{\text{Kg}} * (115 - 25)^{\circ}C * 170 \frac{\text{Kg}}{\text{Kmol}} + 40119,64 \frac{\text{kJ}}{\text{Kmol}}$$

$$22.6(\Delta h)_{CO_2} + 14.165(\Delta h)_{H_2O} + 109.4536(\Delta h)_{N_2} + 8.1 * 10^{-3}(\Delta h)_{SO_2}$$

Con temperatura Tp: 1000 K

$$(\Delta h)_{CO_2}: 9,939 \text{ kJ/Kmol}$$

$$(\Delta h)_{H_2O}: 72788 \text{ kJ/Kmol}$$

$$(\Delta h)_{O_2}: 59176 \text{ kJ/Kmol}$$

$$(\Delta h)_{N_2}: 56157 \text{ kJ/Kmol}$$

Reemplazando da un valor de: 7448 407.71 kJ/Kmol

Con temperatura Tp: 2200 K

$$(\Delta h)_{CO_2}: 103 562 \text{ kJ/Kmol}$$

$$(\Delta h)_{H_2O}: 83 152 \text{ kJ/Kmol}$$

$$(\Delta h)_{O_2}: 66770 \text{ kJ/Kmol}$$

$$(\Delta h)_{N_2}: 63 362 \text{ kJ/Kmol}$$

Reemplazando da un valor de: 8424 132.16 kJ/Kmol

Interpolando se tiene:

2200 K	7 448 407,71
T	2 799 601,3
2200	8 424 182,16

$$T=2112,5714 \text{ K} = 1839.42 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Aproximadamente el 70% de la temperatura de llama adiabática, es la temperatura promedio de gases en la cámara de combustión: $T_{\text{cámara}}=0.70 (1839.42^{\circ}\text{C}) = 1287.594^{\circ}\text{C}$

4.10 DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA TÉRMICA EN EL CALDERO

Tomando como base las mediciones de analizador con mezcla de 30% aceite ácido residual y 70% petróleo industrial 500.

Tabla 21

Datos de analizador de gases

[CO ₂]max	15.2	%	
T _g	181.9	C	
[O ₂]	5.32	%	
[CO]	116	ppm	%
T _{sf}	64		
T _{sg}	154		
B	4		
T _a	31.7		
v	0.4		
[CO ₂]	12.47	%	
N ₂	82.1984	%	

Fuente. Elaboración propia

4.11 RESULTADO DE ANALIZADOR DE GASES DE COMBUSTIÓN

Procesando los datos en una hoja de Excel, se tiene los siguientes resultados

Tabla 22

Pérdida por calor sensible en los gases secos

$P_1 = k \frac{T_g - T_a}{[CO_2]}$	P1	6.22949	Combustible	k
Constante	k	0.48	Diésel 2	0.48
Temperatura de gases	T _g	181.9	Residuales	0.53
Temperatura de ambiente	T _a	31.7	G.L.P	0.4
Concentración de dióxido de carbono	[CO ₂]	11.5733	Gas Natural	35

Tabla 23

Pérdida por la entalpia del vapor de agua en los gases

$P_2 = \frac{([H_2O] + 9[H])(2488 - 4.2T_a + 2.1T_g)}{PCS}$	P2	7.20054	Combustible	[H2O]	PCS (kJ/kg)
Contenido de humedad del combustible	[H2O]	0	Diésel 2	0	42075.88
Contenido de Hidrogeno del combustible	[H]	12.3	G.L.P	0	
Temperatura de ambiente	Ta	31.7	Gas Natural	0.1	
Temperatura de los gases	Tg	181.9			
Poder Calorífico Superior	PCS	40119,64			

Tabla 24

Pérdida por inquemados gaseoso

$P_3 = \frac{[CO]}{[CO_2] + [CO]}$	P3	0.049256	Combustible	k	PCS(kJ/kg)
Constante	k	53	Diesel 2	53	42075.88
Concentración de monóxido de carbono	[CO]	0.0116	G.L.P		
Concentración de dióxido de carbono	[CO2]	12.47	Gas Natural		
Poder Calorífico Inferior	PCI	36501.18			
Poder Calorífico Superior	PCS	40119,64			

Tabla 25

Pérdida por inquemados solidos

$P_4 = 0.14B^2 + 0.08B + 0.07$	P4	2.63
Índice de Bacharach	B	4

Tabla 26

Pérdida por convección

$P_5 = 80 \frac{Q_{P5}}{W_C}$	P5	0.23777	%	
$Q_{P5} = h_{cf} * A_f(T_{sf} - T_a) + h_{cg} * A_g(T_{sg} - T_a)$	Qp5	26.240	kW	
$W_c=9.81*BHP$	Wc	8829	kW	
Potencia nominal del Caldero	BHP	900	BHP	
	Sobre fluido		Sobre gases	
Area de la superficie	Af	46.637	Ag	13.51
$h_c = 1.973 * 10^{-3}(T_s - T_a)^{0.25}(2.857v + 1)^{0.5}$	hcf	0.006885	hcg=	0.0096045
Temperatura de la superficie	Tsf	64	Tsg=	154
Temperatura ambiente	Ta	31.7		
velocidad del viento	v	0.4		

Tabla 27

Pérdida por radiación

$P_6 = 80 \frac{Q_{P6}}{W_C}$	P6	0.072256	%	
$Q_{P6} = (q_{rf} * A_f) + (q_{rg} * A_g)$	Qp6	7.9743	kW	
$W_c=9.81*BHP$	Wc	8829	kW	
Potencia nominal del Caldero	BHP	900	BHP	
	Sobre fluido		Sobre gases	
Area de la superficie	Af	325.16	Ag	13.51
$h_c = 5.763 * 10^{-11}\epsilon [(T_{sg} + 273)^4 - (T_a + 273)^4]$	qrf	0.06410	qrg=	0.3689
Temperatura de la superficie	Tsf	44	Tsg=	154
Temperatura ambiente	Ta	31.7		
Emisividad	e	0.26		

Sumatoria de pérdidas

$\Sigma(P_i)=P1+P2+P3+P4+P5+P6$	$\Sigma(P_i)$	16.4193	%
---------------------------------	---------------	---------	---

Eficiencia Térmica: 83.58 %

4.12 LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES SEGÚN NTP 350.301-2009

Tabla 28

Límites máximos permisibles para calderas de vapor de uso industrial.

Parámetro	Límite de Emisión (mg/Nm ³) ⁽¹⁾		
	Combustible		
	Gas	Líquido	Sólido
Partículas sólidas ⁽²⁾	-----	150	150
SO ₂	300	1500	1500(carbón) 100(bagazo) 500(Bag/petróleo)
NO _x	320	600	750
CO	100	350	500
Opacidad(Índice de Bacharach) ⁽³⁾	0	4	-----

Fuente. NTP 350.301-2009, página 16 de 17

4.13 PARÁMETROS MEDIOAMBIENTALES

Tabla 29

Equivalencia de unidades

GAS	Equivalencia de concentración según gas
CO	1 ppm equivale a 1,25 mg/Nm ³
NO	1 ppm equivale a 1,34 mg/Nm ³
NO _x	1 ppm equivale a 2,05 mg/Nm ³
SO ₂	1 ppm equivale a 2,86 mg/Nm ³
C ₃ H ₈	1 ppm equivale a 1,98 mg/Nm ³

Fuente: NTP. 350.301-2009, página 15 de 17

De los datos, se tiene los siguientes parámetros de gases de combustión, para SO₂=784 ppm, NO_x=218 ppm, NO= 208 ppm y CO = 116 ppm, a partir de las equivalencias de factores de conversión dadas en la norma NTP 350.301-2009, en su página 15 de 17, se determina lo siguiente.

$$-\text{SO}_2 = 784 \text{ ppm} * \frac{2,86 \frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3}}{1 \text{ ppm}} = 2242,24 \frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3} \quad (\text{No Cumple con la NTP 350.301-2009})$$

$$-\text{NO}_x = 218 \text{ ppm} * \frac{2,05 \frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3}}{1 \text{ ppm}} = 446,9 \frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3} \quad (\text{Si cumple con la NTP 350.301-2009})$$

$$-\text{NO} = 208 \text{ ppm} * \frac{1,34 \frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3}}{1 \text{ ppm}} = 278,72 \frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3} \quad (\text{La NTP 350.301-2009, no especifica})$$

$$-\text{CO} = 116 \text{ ppm} * \frac{1,25 \frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3}}{1 \text{ ppm}} = 145 \frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3} \quad (\text{Cumple con la NTP 350.301-2009})$$

4.14 COSTOS DE OPERACIÓN Y ANÁLISIS ECONÓMICO

Según BCRP , el costo de la Tonelada de aceite de pescado, para el mes de enero de 2022 equivale a 2629.96 US\$/tonelada que equivale a 24.45 soles por galón.

Según estadística de Osinergmin en sus precios de referencia de combustibles petróleo residual 500, para el mes de enero de 2022 equivale a 4.75 soles el galón. Obteniéndose que el precio del aceite cuesta 5 veces el precio del petróleo residual 500, aproximadamente, pero para efectos de cálculo se considerando que el aceite ácido residual que se recupera del agua de bombeo no tiene valor económico por lo que se desecha en el agua de bombeo.

Cálculo del ahorro económico por empleo del 30% de aceite ácido residual y 70% petróleo industrial 500 para el consumo de 150 galones de combustible por hora del caldero pirotubular de 900 BHP.

COSTO DE OPERACIÓN COMBUSTIBLE PETRÓLEO INDUSTRIAL 500

$$100\% * 150 \frac{\text{Gal.P.I 500}}{\text{hora}} * 4,75 \frac{\text{Soles}}{\text{Gal.P.1500}} = 712,5 \frac{\text{S/}}{\text{hora}}$$

COSTO DE OPERACIÓN COMBUSTIBLE PETRÓLEO INDUSTRIAL 500

$$70\% * 150 \frac{\text{Gal.P.I 500}}{\text{hora}} * 4,75 \frac{\text{Soles}}{\text{Gal.P.I 500}} = 498,75 \frac{\text{S/}}{\text{hora}}$$

AHORRO ECONÓMICO

$$\text{S/}712,5 - \text{S/}498,5 = 214 \frac{\text{S/}}{\text{hora}}$$

Considerando la operación de una planta de harina de 6 meses al año trabajando 20 horas al día, se tendrá los siguientes indicadores.

Costo de combustible al 100% de uso de petróleo industrial 500

GASTO ANUAL

$$6 \frac{\text{meses}}{\text{año}} * 30 \frac{\text{días}}{1 \text{ mes}} * 20 \frac{\text{horas}}{\text{día}} * 150 \frac{\text{Gal. P. I. 500}}{\text{hora}} * 4,75 \frac{\text{Soles}}{\text{Gal. P. I. 500}} = S/2'565,000.0$$

Costo de combustible al 70% de uso de petróleo industrial 500 y 30% de aceite ácido residual.

$$6 \frac{\text{meses}}{\text{año}} * 30 \frac{\text{días}}{1 \text{ mes}} * 20 \frac{\text{horas}}{\text{día}} * 105 \frac{\text{Gal. P. I. 500}}{\text{hora}} * 4,75 \frac{\text{Soles}}{\text{Gal. P. I. 500}} = S/1'795,500.0$$

AHORRO ANUAL

$$S/2'565,000. - S/1'795,500.0 = S/769,160.0$$

4.15 DISCUSIONES

- El poder calorífico superior e inferior obtenidos mediante ecuaciones de balance calorimétricos son una primera aproximación metodológica para conocer la energía que desprende cada muestra, sus valores van desde 9598 kCal/kg y 8732.4 kCal/kg para el PCS y PCI respectivamente, asimismo los valores calculados mediante el método de balance estequiométrico y entalpías de combustión se aproximan bastante, de estas se obtuvieron 8898.45 kCal/kg considerando agua en estado de vapor 8892 kCal/kg para agua en estado líquido o condensado.
- Respecto de la temperatura de llama adiabática calculada de los ajuste de balance de entalpías de combustión fue necesario utilizar métodos matemáticos para permitir el análisis de que si era posible converger en una temperatura teórica o de llama adiabática considerando que este método de cálculo usa ecuaciones polinomiales de grado enésimo y sus correlaciones funcionan solo para un rango válido de temperaturas, sin embargo, al aplicar el método de Newton Raphson se pueden alcanzar las temperaturas teóricas o de llama adiabática que en consideración superan los datos en tablas termodinámicas que describen entalpías de combustión para especies puras, sin embargo el valor para la muestra de estudio al 30% de aceite ácido residual y 70% de petróleo Industrial 500, entrega un dato de 3416.2 K, un valor muy confiable puesto que las tablas termodinámicas dan alcances máximos de temperaturas hasta 3803 K, como se muestra en el anexo I.
- La eficiencia térmica de la caldera a vapor piro-tubular es de 83.58% y presenta un valor muy aceptable por cuanto las eficiencias entre calderas piro-tubulares con una antigüedad de 10 a 15 años en servicio ronda entre los 83 a 87%, sin embargo los datos que se obtienen del analizador de gases y el cálculo de las pérdidas de calor sensible en los gases secos P_1 equivale al 6.22%, un valor aceptable frente a cifras porcentuales que se obtienen al quemar hidrocarburos puros y otros residuales, la pérdida P_2 entalpía de vapor de agua en los gases, equivale a 7.20% un valor ligeramente elevado y se explica técnicamente por la humedad natural que posee en aceite ácido residual, al ser el aceite un triglicérido conformado por una familia de más de 16 tipos de ácidos grasos, este contiene oxígeno en su cadena molecular, dándole la condición a forma moléculas de agua en fase vapor y con alta probabilidad de condensarse en el recorrido de los gases por los pasos hacia su salida, esta condición es frecuente ya que los gases de combustión al acercarse a la zona de tiro por chimenea, comienza a enfriarse afectando a su presión y temperatura de rocío haciéndola precipitar el agua en estado de vapor a condensado, esta condensación representa otro problema técnico

que resolver basado en regulación de combustión , considerando que la temperatura de los gases a la salida fue de 181.9 °C, un valor elevado, que puede estar asociado a factores como exceso de aire , superficie de transferencia de calor con alta resistencia por depósitos de hollín o productos inquemados que se endurecen en la parte interna de los tubos, y la propia velocidad de los gases en los pasos de la caldera.

- Las pérdidas por inquemados gaseosos en sumatoria porcentual es bajo y equivale a 0.049% pero se registró 116 ppm que excede el margen adecuado , y en términos de efecto sobre la operación de la caldera , este indicador puede ser regulado solo con ajuste ligero de exceso de aire, sabiendo que actualmente la combustión se realiza al 31.2% de exceso de aire, se puede ampliar sin ningún problema hasta 40% considerando el efecto de incremento de velocidad a la salida de gases y por consiguiente la transferencia de calor convectiva , se puede obtener resultados muy favorables al variar la regulación de exceso de aire y el mantenimiento de la superficie de transferencia de calor.
- El ahorro económico equivale a 769,160 soles anuales considerando solo la operación de 20 horas días en planta y operando 6 meses al año, sin embargo los ahorros pueden ser mayores si se considera un pre tratamiento del aceite acido residual antes de ingresarse al sistema de combustión , este pre tratamiento estaría basado en dos etapas de filtrado y un precalentamiento para reducir la humedad , su poder calorífico mejoraría y su estado fluido dinámico para el transporte y atomización en los quemadores seria optimo, se puede incluso alcanzar la integración de más del 30% de aceite ácido residual en mezcla, como lo asegura Castillo Neira.
- Como describe el Ing. Castillo Neira , el aceite ácido de pescado resulta ser más eficiente que el petróleo industriales, sobre la base de un estudio riguroso de sus parámetros de combustión al presentar un servicio de ingeniería para la empresa Exalmar Callao, por la cual propuso en cada una de las plantas de la empresa recircular el aceite ácido que no tiene valor comercial, y que anteriormente se desechaba al mar, sin embargo, el mismo problema se obtuvo al atender un pedido en la ciudad de Pisco sobre el uso de aceite ácido residual en quemadores de calderas y secadores, para el cual la empresa pesquera ameritó una sanción ambiental por evacuar el aceite ácido residual que se obtiene del agua de bombeo, sin embargo la toma de decisión fue venderla como subproducto a empresarios de la industria ladrillera contando con un nuevo problema , el efecto odorizante del pescado, el especialista cita además que esta planta industrial pesquera ubicada en Pisco fue sancionada por la Comunidad Económica Europea y fueron suspendidos por contaminar el mar , en la experiencia con Exalmar Callao , obtuvieron la autorización de Indecopi para utilizar aceite acido de pescado en sus calderas

, la investigación se realizó con los propios ingenieros de planta usándose el 100% de aceite, ácido obteniendo datos de sus propiedades fisicoquímicas de forma satisfactoria como se describe en la conferencia al realizársele la pregunta sobre uso de aceite ácido residual o etil éster residual que se obtiene en las plantas de refinación de aceite de pescado., (<https://www.youtube.com/watch?v=zcHmPtczJnM> (1:39:09)

CAPÍTULO V
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

- Las características fisicoquímicas de la muestra de Aceite ácido de pescado y el petróleo industrial 500 determinan que son estables y miscible cuando se sometieron a mezclas en diversas proporciones concluyéndose que ambos combustibles son compatibles para mezclarse a temperatura de ambiente y en el calentamiento hasta 115°C aproximadamente donde la mezcla consigue su temperatura óptima para ser combustionado en un caldero pirotubular.
- El poder calorífico superior e inferior determinado de manera experimental para el aceite ácido puro equivale a 8998,45 k Cal /kg y el poder calorífico inferior corresponde a 8176 k Cal /kg, para la proporción de mezcla al 20% de aceite ácido y 80 % de petróleo industrial 500 se obtuvo 7897 k Cal /kg y 7031,35 k Cal /kg respectivamente, así mismo para la proporción de mezcla al 30% de aceite ácido de pescado y 70% de petróleo industrial 500 se obtuvo 9598 k Cal /kg y 8732.4 k Cal /kg , para la proporción de mezcla al 40% de aceite ácido y 60% de petróleo industrial 500 se obtuvo 8086 k Cal /kg y 7220,3 kCal /kg y finalmente la proporción de mezcla al 50% de aceite ácido residual y petróleo industrial 500 se tiene 6952 k Cal /kg y 6086,3 k Cal /kg.
- La relación de mezcla al 30% de aceite ácido residual con 70% de petróleo Industrial 500, determina el mayor poder calorífico superior en condiciones obtenidas en el laboratorio corroborándose que en el tiempo de transición de 4 minutos después de combustionar en la bomba calorimétrica se registrando su máximo en 26.98°C por lo cual representa la mezcla óptima.
- La temperatura de llama adiabática calculado en la combustión del 30% de aceite ácido residual y 70% de petróleo Industrial 500 , equivale a 2112.5714 K equivalente a 1839.42 °C, siendo esta temperatura muy próxima y real a los datos esperados , un valor referencial promedio de las que se obtiene cuando se analizan hidrocarburos convencionales, así mismo la eficiencia de combustión registrada por el analizador es de 87.9% y la eficiencia térmica del caldero pirotubular de 900 BHP calculada es 83.58%, siendo un valor aceptable en las condiciones experimentadas.
- Los indicadores ambientales muestran que el nivel de dióxido de azufre medido incumple la NTP 350.301-2009 en 49.4% determinándose la razón del efecto corrosivo en las estructuras expuestas a este gas, además el ahorro económico por el uso del 30% de aceite residual ácido con 70% de petróleo industrial 500 , permite un ahorro de 214 soles por hora de operación considerando que el caldero consume 150 galones de combustible por hora durante 20 horas de operación al día ,durante 6 meses al año con un costo de galón de petróleo Industrial 500 de 4,75 soles , se obtiene un ahorro anual de 769,160.0 soles.

5.2 RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar un análisis fisicoquímico de rigor basado en la composición química del aceite de pescado ya que este está formado por más de 16 tipos de ácidos grasos cada uno con sus propiedades, siendo necesario aproximar su valor energético para los estudios termodinámicos para determinar su temperatura de llama adiabática y otras propiedades térmicas.
- Se recomienda centrifugar el aceite a una temperatura de entre 40 °C a 50 °C a baja RPM durante 15 min a fin de eliminar la mayor cantidad posible de humedad, de esta manera se podrá alcanzar mayor valor de poder calorífico superior en el proceso de experimentación en la bomba calorimétrica.
- Considerar en la etapa de experimentación la presión de hasta 20 psi para determinar si la presión de inyección de oxígeno permite mejorar la oxidación del combustible al interior del calorímetro, este procedimiento puede dar mayor información frente a la situación de tener que incrementar el exceso de aire en el caldero sabiendo que el exceso de aire tiene que sostenerse en el criterio técnico, un exceso elevado puede generar pérdidas de eficiencia en la combustión y dar inicio a la formación de gotas de agua.
- Realizar ajustes en cuanto a las emisiones de dióxido de azufre ya que como se indica el valor registrado de 784 ppm que equivale a 2242.24 mg/Nm³ sobrepasa los límites máximos permisibles en 49.4% produciendo un efecto corrosivo a medida que los gases se van enfriando favoreciendo a su condensación al variar su presión y temperatura de rocío en la corriente de gases que se expulsan por la chimenea.
- Realizar ajuste en los parámetros de combustión considerando el exceso de aire adecuado a fin de que la combustión se de en las condiciones más eficiente, ya que el aceite contiene oxígeno en su cadena molecular esta condición influye en la relación de oxígeno necesario para la oxidación.
- Tener presente que la combustión dada en la bomba calorimétrica se da en una atmósfera de oxígeno, sin embargo, en un caldero pirotubular se usa como oxidante la fracción de oxígeno que contiene el aire siendo aproximadamente el 21%, por ello cuando se hacen ajustes de exceso de aire y se interpretan los resultados se debe tener presente esta situación.

6.0 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRAMOVICH, J. (1973). La industria pesquera en el Perú: génesis, apogeo y crisis: ensayo de interpretación (No. 6). Ediciones Eunafev.
- ARROYO CHALCO., V (2008) "Eficiencia energética y administración de la demanda en el sector productivo.
- BAILEY, A. E. (2020). Aceites y grasas industriales. Reverté.
- BUNGE, M. A. (2017). El planteamiento científico. Revista cubana de salud pública, 43, 470-498.
- BULLA-PEREIRA, E. A., GUERRERO-FAJARDO, C. A., & SIERRA-VARGAS, F. E. (2015). Producción de biodiésel por etanolisis utilizando aceites de fritura de hoteles y su uso en calderas pirotubulares. Iteckne, 12(1), 44-53.
- CASTILLO NEIRA, P. (2015). Manual práctico de combustión industrial.
- GARNER, MADDEN Y RUSHBROOKS, J. CHEM.SOC., 1926,2491-2502; W.E. Garner y F.C. Ranall, Ibid.,1924,881-896; y W.E. Gardner y A.M. Kding, ibid.,1929,1849-1861.
- GONZALES CHÁVEZ, S (2011). Reglas para la redacción de una tesis de maestría y doctorado en ingeniería, Universidad Nacional de Ingeniería,
- MORÁN, M., & SHAPIRO, H. (2012). Fundamentos de termodinámica técnica. Reverté.
- ROBERT H. PERRY, DON W. GREEN, JAMES O. MALONEY "Perry Manual de Ingeniero Químico" 6° Edición, McGraw Hill, México 1994, Tomo I, p.p. 3-155 – 3-162.
- ROJAS FLORES, A (2011), Apuntes de Seminario de Investigación. Universidad Nacional del Santa, E.A.P. Ingeniería en Energía, 2011.
- TRESIERRA AGUILAR, A. (2000). Metodología de la investigación científica. Editorial Biociencia. Trujillo. Perú.
- NTP 350.301-2009 (Calderas industriales: estándar de eficiencia térmica (combustible/vapor) y etiquetado, señala los siguientes límites máximos permisibles).

ZAPATA, ANTONIO (2002). Los actores y la problemática de la pesca industrial peruana 1955-1997. En Glave, L. M. y C. Contreras. Estado y mercado en la Historia del Perú. Lima: IEP. Lima, Perú.

LINKOGRAFÍA

<https://www.petroperu.com.pe/>

<https://estadisticas.bcrp.gob.pe/estadisticas/series/mensuales/resultados/PN01503BM/html/2017-1/2018-1/>

Videoconferencia de Ing. Percy Castillo Neira, y charla sobre uso de Aceite de pescado.

[Enlace videoconferencia youtube](#)

<https://www.youtube.com/watch?v=zcHmPtczJnM> (1:39:09)

ANEXOS

INSTRUMENTO PARA INDICADOR DE VARIABLE DEPENDIENTE: INDICADOR-EFICIENCIA TERMICA
FASE APLICADO-INSTRUMENTACION DE CAMPO

Basado en la NTP.350.300.2008, Método Indirecto.

TABLA B. Procedimiento para la determinación de la eficiencia termia de calderas industriales

Pérdida por calor sensible en los gases secos

$P_1 = k \frac{T_g - T_a}{[CO_2]}$	P1		Combustible	k
Constante	k		Diésel 2	0.48
Temperatura de gases	Tg		Residuales	0.53
Temperatura de ambiente	Ta		G.L.P	0.4
Concentración de dióxido de carbono	[CO2]		Gas Natural	35

Pérdida por la entalpia del vapor de agua en los gases

$P_2 = \frac{([H_2O] + 9[H])(2488 - 4.2T_a + 2.1T_g)}{PCS}$	P2		Combustible	[H2O]	PCS (kJ/kg)
Contenido de humedad del combustible	[H2O]		Diésel 2	0	42075.88
Contenido de Hidrogeno del combustible	[H]		G.L.P	0	
Temperatura de ambiente	Ta		Gas Natural	0.1	
Temperatura de los gases	Tg				
Poder Calorífico Superior	PCS				

Pérdida por inquemados gaseoso

$P_3 = \frac{[CO]}{[CO_2] + [CO]}$	P3		Combustible	k	PCS(kJ/kg)
Constante	k		Diesel 2	53	
Concentración de monóxido de carbono	[CO]		G.L.P		
Concentración de dióxido de carbono	[CO2]		Gas Natural		
Poder Calorífico Inferior	PCI				
Poder Calorífico Superior	PCS				

Pérdida por inquemados solidos

$P_4 = 0.14B^2 + 0.08B + 0.07$	P4	
Índice de Bacharach		

Pérdida por convección

$P_5 = 80 \frac{Q_{P5}}{W_C}$	P5		%	
$Q_{P5} = h_{cf} * A_f(T_{sf} - T_a) + h_{cg} * A_g(T_{sg} - T_a)$	Qp5		kW	
$W_C=9.81*BHP$	Wc		kW	
Potencia nominal del Caldero	BHP		BHP	
	Sobre fluido		Sobre gases	
Area de la superficie	Af		Ag	
$h_c = 1.973 * 10^{-3}(T_s - T_a)^{0.25}(2.857v + 1)^{0.5}$	hcf		hcg=	
Temperatura de la superficie	Tsf		Tsg=	
Temperatura ambiente	Ta			
velocidad del viento	v			

Pérdida por radiación

$P_6 = 80 \frac{Q_{P6}}{W_C}$	P6		%	
$Q_{P6} = (q_{rf} * A_f) + (q_{rg} * A_g)$	Qp6		kW	
$W_C=9.81*BHP$	Wc		kW	
Potencia nominal del Caldero	BHP		BHP	
	Sobre fluido		Sobre gases	
Área de la superficie	Af		Ag	
$h_c = 5.763 * 10^{-11}\epsilon [(T_{sg} + 273)^4 - (T_a + 273)^4]$	qrf		qrg=	
Temperatura de la superficie	Tsf		Tsg=	
Temperatura ambiente	Ta			
Emisividad	e			

Anexo 2. Datos de análisis de combustión de mezcla combustible 30% AAR y 70% P.I.N° 500



STEAM SERVICE E.I.R.L.

E) CALDERA N° 5

i) Comparación con estándares de eficiencia

A continuación, se presentan los rangos obtenidos antes y después de realizados los trabajos de regulación; comparados con los rangos técnicos de eficiencia:

Cuadro N° 9: Resultados del Caldero N° 5 comparados con rangos técnicos de eficiencia.

CALDERO	N° 5				RANGOS		
	DISTRAL 900 BHP						
	MARCA	SIN PRODUCCION		CON PRODUCCION		BAJA	ALTA
LLAMA	BAJA	ALTA	BAJA	ALTA	BAJA	ALTA	VALOR
Eficiencia de gas	88.8	88.5		87.9	85		%
Oxígeno (O2)	5.32	4.78		5.21	3 - 6		%
Dióxido de carbono (CO ₂)	12.47	12.90		12.55	10.5 - 13.5		%
Exceso de aire (EA)	32.2	27.9		31.2	20-30		%
Temperatura de gases (TS)	181.9	191.1		204.9	160-190	190-250	° C
Temperatura de ambiente	31.7	29.1		32.8			° C
Monóxido de carbono (CO)	0	0		116			Ppm
Dióxido de azufre (SO ₂)	802	736		784			Ppm
Óxido Nítrico (NO)	292	321		208			Ppm
Óxidos de nitrógeno (NO _x)	307	337		218			Ppm
P. Bomba de petróleo	90	75		85			PSI
P. Petróleo al quemador	32	54		65			PSI
Presión de retorno	-	-		-			PSI
Presión de aire / vapor	25	30		40			PSI
Temperatura de petróleo	120	115		120			° C

ii) Estado del equipo evaluado

* En llama baja y en llama alta (SIN PRODUCCION Y CON PRODUCCION):



ACTA DE APROBACION DE ORIGINALIDAD

Yo, DR. SALOME GONZALES CHAVEZ

Asesor/presidente de la Unidad de Investigación de la

Facultad:	Ciencias		Educación		Ingeniería	x
Escuela Profesional:	INGENIERÍA EN ENERGÍA					
Departamento Académico:	DE ENERGÍA, FISICA Y MECANICA					
Escuela de Posgrado	Maestría		x		Doctorado	

Programa: MAESTRÍA EN CIENCIAS ENERGÉTICAS MENCION INGENIERÍA ENERGÉTICA

De la Universidad Nacional del Santa; Declaro que el trabajo de investigación intitulado:

INFLUENCIA DE LA PROPORCIÓN DE MEZCLA ACEITE ÁCIDO RESIDUAL DE PESCADO CON PETROLEO INDUSTRIAL Nº 500, EN LA EFICIENCIA TÉRMICA DE CALDEROS INDUSTRIALES

presentado en 128 folios, para la obtención del Grado académico:

()

Constato que la investigación presentada tiene un porcentaje de similitud del 24% el cual se verifica con el reporte de originalidad de Turnitin adjunto.

Quien suscribe la presente, declaro el haber analizado dicho reporte y concluyo que las coincidencias detectadas no se conforman como plagio. A mi claro saber y entender, la investigación cumple con las normas de citas y referencias establecidas por la Universidad Nacional del Santa.

Nuevo Chimbote, 7 de febrero de 2022

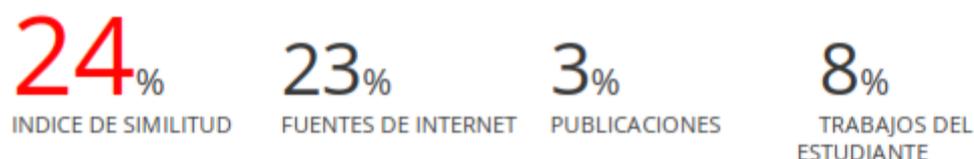
Firma:

Nombres y Apellidos: SALOME GONZALES CHAVEZ

DNI: 06926519

Influencia de la proporción de mezcla aceite ácido residual de pescado con petróleo industrial N° 500, en la eficiencia térmica de calderos industriales

INFORME DE ORIGINALIDAD



FUENTES PRIMARIAS

1	repositorio.uns.edu.pe Fuente de Internet	7%
2	www.combustionindustrial.com Fuente de Internet	3%
3	docslide.us Fuente de Internet	2%
4	docplayer.es Fuente de Internet	2%
5	Submitted to Universidad Privada San Pedro Trabajo del estudiante	1%
6	generaciondepotencia.files.wordpress.com Fuente de Internet	1%
7	www.scribd.com Fuente de Internet	1%
8	bibliotecadigital.usbcali.edu.co Fuente de Internet	1%

9	dspace.unl.edu.ec Fuente de Internet	1 %
10	doku.pub Fuente de Internet	1 %
11	repositorio.usanpedro.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
12	repositorio.uncp.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
13	Submitted to University of Lincoln Trabajo del estudiante	<1 %
14	Redjem Rebbah, Mohamed Yazid Kaikaa, Loubna Boudjelida. "Hybrid winding function method for inductance analysis of a line start synchronous reluctance machine", International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE), 2022 Publicación	<1 %
15	nanopdf.com Fuente de Internet	<1 %
16	repositorio.ucv.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
17	www.ingenieriamecanica.cujae.edu.cu Fuente de Internet	<1 %
18	Submitted to Universidad Cesar Vallejo Trabajo del estudiante	<1 %

19	amexen.org Fuente de Internet	<1 %
20	pdfslide.net Fuente de Internet	<1 %
21	planesynormas.mma.gob.cl Fuente de Internet	<1 %
22	qdoc.tips Fuente de Internet	<1 %
23	econestadisticainemcali.files.wordpress.com Fuente de Internet	<1 %
24	1library.co Fuente de Internet	<1 %
25	sisbib.unmsm.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
26	Submitted to Universidad de Cádiz Trabajo del estudiante	<1 %
27	www.slideshare.net Fuente de Internet	<1 %
28	Submitted to ECCI Trabajo del estudiante	<1 %
29	Submitted to Universidad Politecnica Salesiana del Ecuador Trabajo del estudiante	<1 %
30	ebin.pub Fuente de Internet	

		<1 %
31	www.coursehero.com Fuente de Internet	<1 %
32	Andrés L. Márquez, Jorge R. Wagner, Gonzalo G. Palazolo. "Cream-like emulsions prepared with soy milk 1: Stability studies and formulation", <i>Grasas y Aceites</i> , 2007 Publicación	<1 %
33	core.ac.uk Fuente de Internet	<1 %
34	repositorio.uss.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
35	worldwidescience.org Fuente de Internet	<1 %
36	Zhang, Shuyang. "Desulfurized Jet a Fuel Processing to Produce Hydrogen via Autothermal Reforming and Water-Gas Shift.", <i>The University of Arizona</i> , 2018 Publicación	<1 %
37	repositorio.unamad.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
38	prezi.com Fuente de Internet	<1 %
39	kupdf.net Fuente de Internet	

		<1 %
40	attsu.com.url4es.com Fuente de Internet	<1 %
41	hdl.handle.net Fuente de Internet	<1 %
42	moam.info Fuente de Internet	<1 %
43	www.revflacso.uh.cu Fuente de Internet	<1 %
44	estadisticas.bcrp.gob.pe Fuente de Internet	<1 %
45	Submitted to UNIACC Trabajo del estudiante	<1 %
46	www.fonamperu.org Fuente de Internet	<1 %
47	dspace.unitru.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
48	repositorio.espe.edu.ec Fuente de Internet	<1 %
49	www.imarpe.gob.pe Fuente de Internet	<1 %
50	catalogo-bioeconomia.iica.int Fuente de Internet	<1 %

51	edoc.pub Fuente de Internet	<1 %
52	livrosdeamor.com.br Fuente de Internet	<1 %
53	pdfcookie.com Fuente de Internet	<1 %
54	tesis.ucsm.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
55	www.lareferencia.info Fuente de Internet	<1 %
56	www.mdpi.com Fuente de Internet	<1 %
57	www.msmanuals.com Fuente de Internet	<1 %
58	www.portalmotero.com Fuente de Internet	<1 %
59	D. Braha, O. Maimon. "The measurement of a design structural and functional complexity", IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans, 1998 Publicación	<1 %
60	Spickler, Bailey Ann. "Waste Heat Recovery from a Compression Ignition Engine using a	<1 %

Combined Diesel Particulate Filter Heat Exchanger.", University of Kansas, 2019

Publicación

61	de.slideshare.net Fuente de Internet	<1 %
62	dokumen.pub Fuente de Internet	<1 %
63	eduardomartinezconalep183.wordpress.com Fuente de Internet	<1 %
64	fr.slideshare.net Fuente de Internet	<1 %
65	issuu.com Fuente de Internet	<1 %
66	lmt-fi.blogspot.com Fuente de Internet	<1 %
67	pesquisa.bvsalud.org Fuente de Internet	<1 %
68	stowabecta.cocolog-nifty.com Fuente de Internet	<1 %
69	www.youtube.com Fuente de Internet	<1 %

Excluir citas

Apagado

Excluir coincidencias

Apagado

Excluir bibliografía

Apagado