

Diseño y construcción de un quemador para la generación de energía térmica a partir de aceite usado

Ingrid Catalina Sierra Suarez y Andrés Julián Fonseca Murillo

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de ingeniero mecánico

Director

Yesid Javier Rueda Ordoñez

Doctor en Ingeniería Química

Codirector

Pablo Antonio Nieto Rangel

Estudiante de doctorado en Ingeniería Mecánica

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicomecánicas

Escuela de ingeniería Mecánica

Bucaramanga

2026

Agradecimientos

A Dios, por sostenerme incluso en los momentos donde el alma se cansaba y las fuerzas parecían no alcanzar. Por nunca soltarme y permitirme llegar hasta este sueño que hoy se convierte en realidad.

A mi mamá que, aunque ya no esté físicamente conmigo, sigue viviendo en cada paso que doy. Gracias por creer en mí hasta el final, por enseñarme a ser fuerte y por dejar en mi vida el amor más sincero que he conocido.

A Sara, mi otra mitad y el regalo más bonito que mamá me dejó. Gracias por caminar conmigo aun en mis días más difíciles, por ser hogar, compañía y fuerza cuando sentía que quería rendirme.

A mis amigos, a esos que la vida convirtió en familia. Gracias por crecer conmigo, por las risas, las conversaciones, los abrazos y por permanecer incluso cuando yo misma dudaba de mí. Y también gracias a quienes ya no están hoy en mi vida, porque de alguna manera hicieron parte de mi historia y de este proceso. Cada persona que pasó dejó algo en mí, una enseñanza, una caída o una fuerza que ayudó a construir la mujer que soy hoy. Esta meta también lleva un pedazo de ustedes.

Y finalmente, gracias a cada versión de mí. A esa Cata llena de miedos, dudas y heridas, porque aun así nunca dejó de intentarlo. Gracias por resistir, crecer y convertirse poco a poco en una mujer más fuerte, soñadora y valiente. Hoy, después de todo, ese sueño se cumple: ser ingeniera mecánica.

Catalina sierra

Contenido

Introducción	13
1. Objetivos	15
1.1. Objetivo general:.....	15
1.2. Objetivos específicos:	16
2. Marco teórico	16
2.1. Combustión	17
2.1.1. Combustión completa e incompleta.....	17
2.1.2. Aire estequiométrico o teórico	18
2.1.3. Aire en exceso	18
2.2. Uso de aceite reciclado como combustible.....	18
2.3. Gasificación de aceite	19
2.4. poder calorífico mediante calorimetría de bomba de oxígeno.....	19
2.5. Quemadores	20
2.5.1. Tipos de quemadores utilizados en sistemas de combustión	21
2.5.2. Quemadores de gas	21
2.5.3. Quemadores de líquido	21
2.5.4. Quemadores de solido.....	22
2.5.5. Quemadores de atomización por aire o vapor.....	22
2.5.6. Quemadores atmosféricos	22

2.6. Transferencia de calor por conducción	23
2.7. Transferencia de calor por convección	23
2.8. Transferencia de calor por radiación.....	24
2.9. Número de Reynolds.....	25
2.10. Número de Nusselt.....	25
2.11. Número de Grashof.....	27
2.12. Número de Rayleigh	28
2.13. Resistencia térmica total	28
2.14. Calor suministrado por el combustible	29
2.15. Flujo másico.....	30
2.16. Calor transportado por los gases	30
2.17. Calor útil	31
2.18. Perdidas térmicas	32
2.19. Eficiencia de combustión.....	32
2.20. Eficiencia térmica	33
2.21. Pirólisis	33
2.22. Mecha Capilar.....	34
2.23. Matriz Pugh.....	35
3. Proceso Metodológico	36
3.1. Selección del aceite combustible	36

3.1.1. Revisión de las propiedades térmicas de cada tipo de aceite.....	37
3.1.1.1. Aceite vegetal.....	37
3.1.1.2. Aceite De motor.....	39
3.1.2. Revisión de la facilidad de adquisición de cada tipo de aceite.....	41
3.2. Matriz Pugh para la determinación del aceite.....	43
3.3. Diseño de un sistema de combustión accesible y de bajo costo	47
3.3.1. Identificación de necesidades mediante Matriz QFD	47
4. Diseño del quemador	54
4.1. Alternativa 1	54
4.2. Alternativa 2.....	57
4.3. Elección de ventilador.....	60
4.4. Creación de planos en software SolidWorks.....	62
4.4.1. Modelado de piezas en software SolidWorks	62
4.4.2. Ensamble de piezas en SolidWorks	66
4.5. Evaluación de diseño mediante construcción	67
4.5.1. Análisis y selección de materiales.....	67
4.5.2. Obtención de Materiales	69
4.5.2.1. Cámara de combustión.....	69
4.5.2.2. Sistema de suministro de aire.	72
4.5.2.3. Estructura de soporte de la cámara de combustión.....	73
4.5.3. Ensamble de prototipo	75
5. Análisis estequiométrico y de transferencia de calor.....	77

5.1. Determinación de la formula empírica del aceite de palma.....	77
5.1.1. Cálculos estequiométricos requeridos para la combustión	81
5.1.2. Cálculos de llama adiabática.....	84
5.1.3. Cálculo de temperatura de productos.....	86
5.1.4. Consumo Teórico de aceite	88
5.2. Cálculos de transferencia de calor	89
5.2.1. Desarrollo experimental y condiciones de operación	89
5.2.1.1. Modelado térmico de la cámara combustión.	91
5.2.1.2. Transferencia de calor por conducción.	92
5.2.1.3. Transferencia de calor por convección.	93
5.2.1.4. Coeficiente total de transferencia de calor.	96
5.2.2. Resistencia térmica total	98
5.2.2.1. Cálculo de calores generados en el sistema.	100
5.2.2.2. Calor suministrado por el combustible.	100
5.2.2.3. Calor transportado por los gases de combustión.....	102
5.2.2.4. Calor útil.	104
5.2.2.5. Pérdidas térmicas.	106
5.2.2.6. Cálculo De Calor Experimental.	108
5.2.3. Eficiencia de combustión.....	110
5.2.4. Eficiencia Térmica Del Equipo.....	112
6. Discusión y Resultados	115
6.1. Prueba de funcionalidad del prototipo	115
6.1.1. Prueba 1. Aceite limpio.....	117

6.1.2. Prueba 2. Aceite limpio con mecha de algodón.....	117
6.1.3. Prueba 3. Aceite de cocina usado.....	118
6.1.4. Prueba 4. Aceite de cocina usado con mechera de algodón.....	118
6.1.5. Prueba 5. Mezcla de aceite de cocina usado y gasolina.....	118
6.1.6. Análisis de las pruebas preliminares	119
7. Viabilidad Económica	120
7.1. Costos de Fabricación	120
7.2. Costos de Operación	121
8. Conclusiones	125
9. Recomendaciones	126
Referencias Bibliográficas	128
Apéndices.....	131

Lista de Tablas

Tabla 1. Matriz Pugh para la determinación de aceite combustible	44
Tabla 2. Matriz QFD requerimientos de diseño del quemador	52
Tabla 3. Matriz Puch Para la selección de alternativa	59
Tabla 4. Condiciones experimentales de operación.....	90
Tabla 5. Dimensiones y propiedades térmicas de los materiales empleados	92
Tabla 6. Resistencias térmicas por conducción.....	93
Tabla 7. Propiedades termo físicas del aire.....	94
Tabla 8. Resultados de análisis convectivo	95
Tabla 9. Coeficiente convectivo externo.....	96
Tabla 10. Transferencia de calor por radiación	97
Tabla 11. Coeficiente total de transferencia.....	98
Tabla 12. Resistencia térmica total del sistema	99
Tabla 13. Resultados de calor suministrado por el combustible	101
Tabla 14. Parámetros utilizados para el cálculo del calor transportado por los gases	102
Tabla 15. Resultados de calor transportado por los gases.....	103
Tabla 16. Parámetros utilizados para el cálculo de calor útil.....	104
Tabla 17. Resultados de calor útil	105
Tabla 18. Parámetros utilizados para el cálculo de perdidas térmicas	107
Tabla 19. Resultados de perdidas térmicas	107
Tabla 20. Resultados de calor experimental total	109
Tabla 21. Resultados de eficiencia de combustión	110

Tabla 22. Resultados de eficiencia térmica	113
Tabla 23. Resumen de las pruebas preliminares	116
Tabla 24. Costos de fabricación de sistema de combustión	120
Tabla 25 Comparación de Precios GLP-Aceite Usado	123

Lista de figuras

Figura 1. Matriz Pugh de referencia	36
Figura 2 Matriz QFD de referencia.....	48
Figura 3. Estufas tradicionales de leña y carbón.....	49
Figura 4. Uso de estufas de leña y carbón	50
Figura 5. Afectaciones por exposición de humo	51
Figura 6. Aceptación del quemador propuesto	51
Figura 7. Alternativa de diseño 1	56
Figura 8. Alternativa de diseño 2	58
Figura 9. Equipo seleccionado para el suministro de aire	62
Figura 10 Modelo CAD Cámara de Combustión	63
Figura 11 Modelo CAD Sistema Estructural	64
Figura 12 Modelo CAD Tubería de Suministro de Aire	65
Figura 13 Modelo CAD Tubería Alimentación de Aceite	66
Figura 14 Modelo CAD Ensamblaje Sistema de Combustión.....	67
Figura 15. Cámara de combustión fabricada en acero inoxidable.	71
Figura 16. Tubería de salida de aire	73
Figura 17. Estructura de soporte	75
Figura 18. Evaluación de funcionamiento	76
Figura 22 Tubería de aire y estructura de soporte.....	132

Lista de apéndices

Apéndice A. Fotografías de materiales y proceso de fabricación.....	131
Apéndice B. Código de cálculo de transferencia de calor	134
Apéndice C. Código de cálculos de Combustión.....	140
Apéndice D. Planos de Componentes.....	146

Resumen

Título: Diseño y construcción de un quemador para la generación de energía a partir de aceite usado *

Autores: Andrés Julian Fonseca Murillo, Ingrid Catalina Sierra Suarez **

Palabras Clave: aceite usado, quemador, energía térmica, combustión, transferencia de calor, combustible alternativo, eficiencia térmica.

Descripción:

El presente trabajo de investigación se centra en el diseño y construcción de un quemador de bajo costo para la generación de energía térmica a partir de aceite usado, como alternativa para el aprovechamiento energético de residuos líquidos y para aplicaciones en comunidades con acceso limitado a fuentes convencionales de energía térmica. Inicialmente se realizó una evaluación comparativa entre el aceite de cocina y el aceite de motor usado, considerando criterios como poder calorífico, accesibilidad, impacto ambiental, comportamiento durante la combustión y costo de adquisición. A partir de un análisis se seleccionó el aceite de cocina usado como el combustible más adecuado para el sistema propuesto. Posteriormente, se diseñó teniendo en cuenta, el sistema de combustión, considerando el suministro de aire y combustible, la geometría de la Cámara de combustión, la selección de materiales, el aislamiento térmico. La facilidad de fabricación y la seguridad operacional.

Prototipo con modelado mediante el software solidworks, evaluado experimentalmente bajo 2 condiciones ambientales diferentes. Utilizando aproximadamente 400 ml de combustible y 1 L de agua en cada ensayo. Se obtuvieron 2 temperaturas, de llama 796,5 °C y 510 °C y tiempos de ebullición completa del agua de 90 y 37 minutos. Los resultados evidencian la viabilidad del sistema para el aprovechamiento del aceite usado en aplicaciones de generación térmica a pequeña escala

* Trabajo de Grado

** Facultad de ingenierías fisicomecánicas, Escuela de ingeniería mecánica, Director Yesid Javier Rueda Ordoñez, Codirector Pablo Antonio Nieto Rangel

Abstract

Title: Design and construction of a burner for thermal energy generation using used oil*

Authors: Andrés Julian Fonseca Murillo, Ingrid Catalina Sierra Suarez**

Key Words: Used oil, burner, thermal energy, combustion, heat transfer, alternative fuel, thermal efficiency.

Description:

This research focuses on the design and construction of a low-cost burner for thermal energy generation from used oil, as an alternative for the energy recovery of liquid wasted and for applications in communities with limited access to conventional thermal energy sources. Initially, a comparative evaluation was conducted between used cooking oil and used motor oil, considering criteria such as calorific value, accessibility, environmental impact, combustion performance, and acquisition cost. Based on this analysis, used cooking oil was selected as the most suitable fuel for the proposed system. Subsequently, the combustion system was designed considering the air and fuel supply, combustion chamber geometry, material selection, thermal insulation, ease of manufacturing, and operational safety.

The prototype was modelled using SolidWorks and experimentally evaluated under two different environmental conditions. Approximately 400mL of fuel and 1 L of water were used in each test. Flame temperatures of 796,5 °C and 510 °C were obtained, whit complete water boiling times of 90 and 37 minutes respectively. The results demonstrate the feasibility of the system for the utilization of used oil in small-scale thermal energy generation applications.

* Bachelor Thesis

** Facultad de ingenierías fisicomecánicas, Escuela de ingeniería mecánica, Director Yesid Javier Rueda Ordoñez, Codirector Pablo Antonio Nieto Rangel

Introducción

La generación de energía térmica desempeña un papel fundamental tanto en aplicaciones domesticas como industriales, debido a su importancia en actividades como la cocción de alimentos, calefacción y diversos productivos. Actualmente, el gas natural es una de las principales fuentes de energía utilizadas para estos fines gracias a su eficiencia y facilidad de uso. Sin embargo, en numerosas zonas rurales el acceso a este servicio continúa siendo limitado. Datos reportados por la escuela nacional de calidad de vida (ECV) del año 2023 evidencian que únicamente el 8.2% de los hogares rurales en Colombia cuentan con acceso al servicio de gas natural (DANE, 2023).

La ausencia de este recurso energético obliga a muchas comunidades rurales a recurrir al uso de biomasa tradicional, principalmente leña, como alternativa para generación de calor. No obstante, la combustión de biomasa produce emisiones contaminantes y material particulado, que deterioran la calidad del aire dentro de las viviendas y favorecen el desarrollo de enfermedades respiratorias como el asma y la enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC) (Gutiérrez Muñoz, 2019). Esta problemática resalta la necesidad de desarrollar alternativas energéticas accesibles, eficientes y con menor impacto ambiental para comunidades con acceso limitado a fuentes convencionales de energía térmica.

En respuesta a esta problemática, diferentes investigaciones han estudiado el aprovechamiento energético de residuos combustibles derivados de hidrocarburos, entre ellos los aceites usados. Estas sustancias suelen ser desechadas de manera inadecuada en el suelo o sistemas de alcantarillado, generando contaminación ambiental y afectaciones en las propiedades físicas del terreno. Estudios realizados por Villena Martínez, villaroel y León (2019), evidenciaron que la

contaminación por aceites usados altera propiedades geotécnicas del suelo como la densidad y la compresibilidad.

A pesar de ser considerados residuos contaminantes, los aceites usados poseen propiedades energéticas debido a su contenido de hidrocarburos y elevado poder calorífico, lo que permite su aprovechamiento en procesos de combustión controlada. Sin embargo, la implementación de este tipo de combustibles representa retos relacionados con la viscosidad, estabilidad de llama y control de emisiones contaminantes, aspectos importantes en el diseño de sistemas de combustión eficientes y seguros.

El propósito de este proyecto es diseñar y construir un quemador que emplee aceite como combustible para la generación de energía térmica. Para ello, se desarrollará un sistema de combustión de bajo costo orientado al aprovechamiento energético de residuos líquidos combustibles y a la búsqueda de alternativas energéticas para comunidades rurales con acceso limitado al servicio de gas natural. A través del análisis experimental del sistema se busca evaluar variables como estabilidad de llama, consumo de combustible y funcionamiento del dispositivo.

En resumen, se plantea la siguiente pregunta de investigación: ¿Es el aceite usado una alternativa viable como combustible para la generación de energía térmica para las comunidades rurales sin acceso al servicio de gas natural?

1. Objetivos

1.1. Objetivo general:

Desarrollar un dispositivo que utilice aceite reciclado como fuente de energía, promoviendo la reutilización y la reducción de desechos contaminantes

1.2. Objetivos específicos:

Determinar el combustible líquido más accesible y menos contaminante, considerando su viabilidad en la combustión.

Diseñar un sistema de combustión accesible y de bajo costo, adaptado a las necesidades y recursos de comunidades con suministro limitado de gas, promoviendo la sostenibilidad mediante la reutilización de aceite reciclado.

Verificar el funcionamiento del quemador mediante la construcción, comparándolo con alternativas que empleen gas natural presentes en el mercado

2. Marco teórico

El presente proyecto se centra en el diseño de un quemador específicamente adaptado para la utilización de aceite usado como combustible. Esta iniciativa surge de la necesidad de abordar la problemática de la disposición inadecuada de aceites usados, los cuales representan una fuente significativa de contaminación ambiental. La búsqueda de alternativas para la gestión y valorización de estos residuos es crucial para mitigar sus impactos negativos y promover prácticas más sostenibles. La combustión controlada del aceite usado, mediante un diseño de quemador optimizado, se presenta como una vía potencial para la recuperación de energía, siempre considerando la importancia de minimizar las emisiones contaminantes asociadas a este proceso.

2.1. Combustión

La combustión es un proceso químico en el que se oxida un combustible estando por encima su temperatura de ignición, liberando energía en forma de calor y luz, este proceso es fundamental para la generación de energía térmica y en una extensa variedad de aplicaciones industriales y cotidianas.

La combustión convierte la energía química que hay dentro del combustible en energía térmica y productos gaseosos, estos productos dependen del tipo de combustión que se relaciona con la cantidad de oxidante que hay en la reacción (Cengel & Boles, 2019).

2.1.1. Combustión completa e incompleta

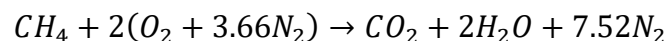
Una combustión completa se da cuando los componentes del combustible se queman completamente y oxidan completamente, cuando el carbono (C) se convierte en dióxido de carbono (CO_2), el hidrogeno (H) se transforma en vapor de agua (H_2O) y en caso de haber azufre (S) se convierte en dióxido de azufre (SO_2), pero cuando esto no ocurre, se considera un proceso

de combustión incompleta, en este caso los productos gaseosos contienen combustible o componentes no oxidados como H_2 , CO , OH , entre otros.

Una de las razones por las que se dan los procesos de combustión incompletos es la insuficiencia de oxígeno, aunque no es la única causa, otro motivo puede ser la disociación que hace referencia a la descomposición de los productos de combustión a altas temperaturas.

2.1.2. Aire estequiométrico o teórico

El aire estequiométrico es el nombre que se le da a la cantidad mínima de aire que se necesita para el proceso de combustión completa, con el propósito que cuando el combustible se queme por completo, no habrá ninguna molécula de oxígeno sin reaccionar en productos, cualquier proceso de combustión que tenga una cantidad de aire que este debajo de este será inequívocamente incompleto (Cengel & Boles, 2019). Como, por ejemplo



2.1.3. Aire en exceso

En la realidad en los procesos de combustión se acostumbra a emplear una cantidad de aire más alta que la estequiométrica, esto para asegurar la combustión completa y para poder controlar la temperatura dentro de la cámara de combustión, el aire en exceso se suele expresar como exceso de aire porcentual (Cengel & Boles, 2019).

2.2. Uso de aceite reciclado como combustible

Los aceites usados ya sean de cocina o de motor pueden utilizarse como combustible debido a su composición, según (Vásquez de Díaz, 2004) se estima que aproximadamente el 60% de una carga de aceites de motor usados son hidrocarburos formados principalmente por carbono

e hidrogeno que es lo que le confiere su potencial energético ya que desprenden mucha energía al momento de su combustión.

Por otro lado, los aceites de cocina se han convertido en una alternativa popular de materia prima para la obtención de biodiesel que es un combustible renovable que posee propiedades cercanas a las del petróleo (Medina Ramírez, Chávez Vela, & Jáuregui Rincón, 2012). Humani Cordoba (2023) realizo un estudio en el que encontró que el aceite vegetal usado puede ser una materia prima para la producción de biodiesel con un rendimiento de 97,5% cumpliendo con los estándares de calidad de la norma ASTM 6751

2.3. Gasificación de aceite

La gasificación es un proceso en el que un material combustible se oxida o quema en una condición de bajo nivel de oxígeno a una temperatura aproximada entre los 500°C y 900°C, Generando un cambio en su estructura química. Como producto de esta oxidación se obtienen gases combustibles como el monóxido de Carbono (CO), el Hidrogeno (H₂), nitrógeno (N₂), entre otros que reciben el nombre de gases de síntesis que puede ser empleado para la generación de calor. (Marquez Lasso,2012) ;(FAO,2014).

2.4. poder calorífico mediante calorimetría de bomba de oxígeno

El poder calorífico de un combustible constituye una de sus propiedades más importantes, ya que permite cuantificarla energía liberada durante su proceso de combustión. Para su determinación experimental se emplea el método de calorimetría de bomba, proceso que se realiza con equipos especializados como el calorímetro PARR 6200.

Este equipo corresponde a un calorímetro de bomba de oxígeno de tipo isoperibólico, lo que implica que la temperatura del entorno se mantiene prácticamente constante durante el ensayo.

que diseñado para medir con alta precisión el calor liberado durante la combustión completa de una muestra en condiciones controladas. El principio de funcionamiento se basa en una combustión en un ambiente de oxígeno pura a alta presión dentro de una cámara sellada, donde la energía liberada se transfiere a un medio circundante, en este caso una camisa de agua.

El balance energético del sistema se expresa como:

$$Q = C_{calorifica} * \Delta T \quad (1)$$

Donde Q es el calor liberado por la combustión en kJ , $C_{calorifica}$ es la constante calorimétrica del sistema en kJ/K . Y ΔT es el incremento de temperatura registrado en K

(*Calorímetro Isoperibólico 6200 - Parr Instrument (Español)*, s/f) explica que, durante el ensayo, una muestra de masa conocida es colocada en un crisol dentro de la bomba, la cual es presurizada con oxígeno. Posteriormente, la muestra es encendida mediante un sistema eléctrico.

El resultado de este proceso es el poder calorífico superior o HHV por sus siglas en inglés (Higher Heating Value). Dato indispensable para la determinación parámetros como la entalpia de formación y temperatura de llama adiabática del combustible.

2.5. Quemadores

Los quemadores son dispositivos diseñados para realizar la combustión controlada de un combustible mediante su adecuada mezcla con el aire, permitiendo generar energía térmica dentro de una cámara de combustión. Su función principal consiste en regular el suministro de combustible y aire con el fin de garantizar una combustión eficiente, estable y segura. Dependiendo

del tipo de combustible utilizado, estos sistemas pueden incorporar mecanismos de atomización, pulverización o vaporación, los cuales facilitan el encendido y mejoran la reacción del combustible con el oxígeno presente en el aire.

2.5.1. Tipos de quemadores utilizados en sistemas de combustión

Según lo expuesto por Kohan (2021), existen diferentes tipos de quemadores cuya clasificación dependen del combustible empleado y las características del proceso de combustión.

2.5.2. Quemadores de gas

Los quemadores de gas utilizan combustibles gaseosos, como gas natural, para producir una llama continua y controlada. En estos sistemas, el combustible se mezcla con el aire antes o durante la combustión, formando una mezcla inflamable que libera energía térmica al encenderse. Este tipo de quemadores permite un control más sencillo de la combustión debido a la facilidad con la que los gases se mezclan homogéneamente con el aire. Además, generan menos emisiones contaminantes y son ampliamente utilizados en aplicaciones domésticas, industriales y sistemas de calefacción.

2.5.3. Quemadores de líquido

Los quemadores de combustible líquido emplean sustancias como diésel, fuel oil o aceites derivados del petróleo. Para lograr una combustión eficiente, el combustible debe transformarse previamente en pequeñas gotas mediante un proceso de atomización. Este procedimiento incrementa el área de contacto entre el combustible y el oxígeno, favoreciendo una combustión más rápida y completa. Debido a estas características, este tipo de quemadores es utilizado frecuentemente en calderas industriales, hornos y sistemas térmicos de gran capacidad.

2.5.4. Quemadores de solido

Los quemadores de combustible sólido están diseñados para operar con materiales como carbón pulverizado, biomasa o residuos industriales. En muchos casos, el combustible debe triturarse o pulverizarse previamente para mejorar su mezcla con el aire y aumentar la eficiencia de la combustión. Estos sistemas requieren mecanismos especiales de alimentación y transporte del combustible, ya que los sólidos no pueden mezclarse directamente con el aire de la misma manera que los combustibles gaseosos. Su aplicación es común en centrales térmicas y procesos industriales de generación de energía.

2.5.5. Quemadores de atomización por aire o vapor

Los quemadores de atomización por aire o vapor utilizan corrientes de aire o vapor a alta temperatura para fragmentar el combustible líquido en gotas muy pequeñas antes de ingresar a la cámara de combustión. Este método mejora la pulverización del combustible, facilitando su evaporación y permitiendo una combustión más eficiente y estable. Como resultado, se obtiene un mejor aprovechamiento energético y una transferencia de calor más uniforme. Estos sistemas suelen emplearse en procesos industriales donde se requiere un control más preciso de la combustión.

2.5.6. Quemadores atmosféricos

Los quemadores atmosféricos funcionan aprovechando la velocidad de salida del combustible gaseoso para arrastrar el aire necesario para la combustión. Debido a este principio de funcionamiento, no requieren ventiladores ni sistemas mecánicos para el suministro de aire, ya que la mezcla aire-combustible se produce de manera natural. Se caracterizan por tener un diseño simple y económico, simplemente utilizados en estufas y calentadores domésticos.

2.6. Transferencia de calor por conducción

La transferencia de calor por conducción es un mecanismo mediante el cual la energía térmica se transfiere a través de un material solido debido a una diferencia de temperaturas. En la cámara se transfiere radialmente desde el interior hacia el ambiente atravesando las diferentes capas del sistema, conformadas por acero inoxidable, fibra aislante y mortero refractario.(*transferencia-de-calor-y-masa-yunus-cengel*, s/f)

La resistencia térmica por conducción en cilindros multicapa se calcula mediante:

$$R_{cond} = \frac{\ln(\frac{r_2}{r_1})}{2 * \pi * K * L} \quad (2)$$

Donde:

- r_1 : radio interno [m]
- r_2 : radio externo [m]
- K corresponde a la conductividad térmica del material [$\frac{W}{m \cdot K}$]
- L es la altura del cilindro [m]

2.7. Transferencia de calor por convección

La transferencia de calor por convección ocurre entre una superficie sólida y un fluido en movimiento. Este mecanismo depende de las propiedades térmicas del fluido, de la velocidad de circulación y de la diferencia de temperaturas entre la superficie y el medio circundante(*INCROPERA - Transferencia de calor*, s/f)

En el quemador se consideró convección interna entre los gases calientes y la pared metálica de la cámara, así como convección externa entre la superficie del aislamiento y el aire ambiente.

La resistencia térmica por convección se calcula mediante:

$$R_{conveccion} = \frac{1}{h * A} \quad (3)$$

Donde:

- h es el coeficiente de transferencia de calor $\left[\frac{W}{m^2 * K}\right]$
- A es el área superficial de calor $[m^2]$

2.8. Transferencia de calor por radiación

La radiación térmica es el mecanismo de transferencia de calor mediante ondas electromagnéticas emitidas por un cuerpo debido a su temperatura. A altas temperaturas, la radiación representa una parte importante de las pérdidas energéticas del sistema. (Holman, 1997)

El coeficiente de transferencia de calor por radiación se determinó mediante:

$$h_{rad} = \varepsilon * \sigma * (T_s^2 + T_{amb}^2) * (T_s + T_{amb}) \quad (4)$$

Donde:

- ε : emisividad del mortero refractario
- σ : constante de Stefan-Boltzman $\left[5.67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 * K^4}\right]$
- T_s : temperatura superficial [K]

- Tamb: temperatura ambiente [K]

2.9. Número de Reynolds

El número de Reynolds es un parámetro adimensional que expresa la relación entre las fuerzas de inercia y las fuerzas viscosas presentes en un fluido en movimiento. Este número permite identificar el régimen de flujo, clasificándolo como laminar, transicional o turbulento, siendo un parámetro fundamental para la selección de correlaciones de transferencia de calor y el análisis del comportamiento del flujo alrededor de la cámara de combustión. *(transferencia-de-calor-y-masa-yunus-cengel, s/f)*

El número de Reynolds se calcula mediante:

$$Re = \frac{V * D}{\vartheta} \quad (5)$$

Donde:

- V es la velocidad del aire $\left[\frac{m}{s}\right]$
- D diámetro externo del cilindro [m]
- ϑ viscosidad cinemática del aire $\left[\frac{m^2}{s}\right]$

2.10. Número de Nusselt

El número de Nusselt es un parámetro adimensional utilizado para relacionar la transferencia de calor por convección térmica en un fluido. Este número permite evaluar la intensidad del intercambio térmico entre una superficie sólida y el fluido que la rodea *(transferencia-de-calor-y-masa-yunus-cengel, s/f)*

En el análisis térmico de la cámara se emplearon correlaciones de convección natural y convección forzada sobre cilindros horizontales con el propósito de determinar el coeficiente convectivo externo del sistema.

Para el caso de convección natural se utilizaron correlaciones basadas en el modelo Churchill y Chu para cilindros horizontales, expresadas mediante:

$$Nu_{nat} = \left(0.825 + \frac{0.387Ra^{1/6}}{\left[1 + \left(\frac{0.492}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{8/27}} \right)^2 \quad (6)$$

Donde:

- Ra número de Rayleigh
- Pr número de Prandtl

Esta correlación permitió estimar la transferencia de calor por convección natural alrededor de la cámara de combustión.

Por otro lado, para la convección forzada se empleó la correlación de Churchill y Bernstein para flujo externo sobre cilindros.

$$NU_{forzado} = 0.3 + \frac{0.62Re^{1/2}Pr^{1/3}}{\left[1 + \left(\frac{0.4}{Pr} \right)^{2/3} \right]^{1/4}} * \left[1 + \left(\frac{Re}{282000} \right)^{5/8} \right]^{4/5} \quad (7)$$

Donde:

- Nu_forzado es el número Nusselt para convección forzada.
- Pr: número de prandtl

Esta ecuación fue utilizada para determinar el comportamiento convectivo del flujo de aire alrededor de la superficie externa del quemador.

2.11. Número de Grashof

El número de Grashof es un parámetro adimensional utilizado en procesos de convección natural. Este número relaciona las fuerzas de flotación generadas por las diferencias de temperatura con las fuerzas viscosas del aire alrededor de superficies calientes debido a variaciones de densidad ocasionadas por el calentamiento del fluido. (INCROPERA - Transferencia de calor, s/f)

El número de Grashof se calcula mediante:

$$Gr = \frac{g * \beta * \Delta T * D^3}{\nu^2} \quad (8)$$

Donde:

- g es la gravedad $\left[\frac{m}{s^2}\right]$
- β coeficiente de expansión térmica $\left[\frac{1}{K}\right]$
- ΔT diferencia de temperaturas [K]
- D diámetro del cilindro [m]
- ν viscosidad cinemática del aire $\left[\frac{m^2}{s}\right]$

2.12. Número de Rayleigh

El número de Rayleigh es un parámetro adimensional utilizado en transferencia de calor por convección natural. Este número combina efectos de Grashof y del número de Prandtl, permitiendo evaluar el comportamiento térmico del fluido bajo condiciones de flotación térmica. (Holman, 1997)

El número de Rayleigh se calculó mediante:

$$Ra = Gr * Pr \quad (9)$$

Donde:

- Gr: número de Grashof.
- Pr: número de Prandtl.

2.13. Resistencia térmica total

La resistencia térmica total representa la oposición que presenta un sistema al flujo de calor por conducción, convección y radiación. Este parámetro permite cuantificar las pérdidas térmicas y analizar el comportamiento del sistema durante el proceso de combustión. (*transferencia-de-calor-y-masa-yunus-cengel*, s/f)

Esta ecuación permitió evaluar el comportamiento térmico global de la cámara y determinar el efecto del aislamiento térmico. La resistencia térmica total se expresó mediante:

$$R_{total} = R_{acero} + R_{fibra} + R_{mortero} + R_{conv_interna} + R_{con_externa} \quad (10)$$

Donde:

- R_{acero} : resistencia térmica por conducción del acero inoxidable.
- R_{fibra} : resistencia térmica por conducción de la fibra aislante.
- R_{mortero} : resistencia térmica por conducción del mortero refractario.
- $R_{\text{conv_interna}}$: resistencia térmica por convección interna.
- $R_{\text{con_externa}}$: resistencia por convección externa.

2.14. Calor suministrado por el combustible

El calor suministrado por el combustible corresponde a la energía liberada durante el proceso de combustión del aceite utilizado en el sistema. Este parámetro representa la potencia térmica disponible para el proceso de transferencia de calor. AN INTRODUCTION TO COMBUSTION (s/f)

Esta ecuación permitió determinar la energía liberada durante el funcionamiento experimental del quemador. La potencia térmica suministrada se calculó mediante:

$$Q_{\text{comb}} = m_{\text{aceite}} * PCI \quad (11)$$

Donde:

- m_{aceite} : flujo masico del aceite $\left[\frac{Kg}{s} \right]$

- PCI: poder calorífico inferior del aceite $\left[\frac{J}{kg}\right]$

2.15. Flujo másico

El flujo masico representa la cantidad de masa que atraviesa un sistema durante un intervalo de tiempo determinad. Este parámetro es fundamental en el análisis energético y en los procesos de combustión debido que permite evaluar el consumo de combustible y la generación de gases.(*transferencia-de-calor-y-masa-yunus-cengel*, s/f)

El flujo masico se calculó mediante:

$$\dot{m} = \rho * \frac{V}{t} \quad (12)$$

Donde:

- ρ : densidad del aceite $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$
- V : volumen de combustible utilizado $[m^3]$
- t : tiempo total de combustión $[s]$

2.16. Calor transportado por los gases

Durante el proceso de combustión, por parte de la energía liberada es evacuada mediante los gases calientes generados dentro de la cámara. Este calor representa una fracción importante de las pérdidas energéticas del sistema.(AN INTRODUCTION TO COMBUSTION, s/f)

El calor transportado por los gases se determinó mediante:

$$Q_{gases} = m_{gases} * Cp * (T_{salida} - T_{amb}) \quad (13)$$

Donde:

- m_{gases} : flujo másico de gases $\left[\frac{kg}{s}\right]$
- Cp : Calor específico de los gases $\left[\frac{J}{kg \cdot K}\right]$
- T_{salida} : temperatura de salida de gases $[K]$
- T_{amb} : temperatura ambiente $[K]$

2.17. Calor útil

El calor útil corresponde a la energía térmica efectivamente transferida al agua durante el proceso de calentamiento y evaporación desarrollado en el sistema experimental. (*transferencia-de-calor-y-masa-yunus-cengel, s/f*)

El cálculo de calor útil se realizó mediante:

$$Q_{util} = \frac{m(Cp * \Delta T + h_{fg})}{\Delta t} \quad (14)$$

- m : masa del agua $[kg]$
- Cp_{bomba} : calor específico del agua $\left[\frac{J}{kg \cdot K}\right]$
- ΔT : variación de temperatura del agua $[^{\circ}C]$
- h_{fg} : calor latente de vaporización $\left[\frac{J}{kg}\right]$

2.18. Pérdidas térmicas

Las pérdidas térmicas representan la energía disipada desde la cámara hacia el ambiente mediante conducción, convección y radiación. Estas pérdidas influyen directamente sobre el rendimiento energético del sistema. (Holman, 1997)

Las pérdidas térmicas se calcularon mediante:

$$Q_{perdidas} = \frac{T_i - T_s}{R_{total}} \quad (15)$$

- $Q_{perdidas}$: flujo de pérdidas térmicas $[W]$
- T_i : temperatura interna $[K]$
- T_s : temperatura superficial $[K]$
- R_{total} : resistencia térmica total $\left[\frac{K}{W}\right]$

2.19. Eficiencia de combustión

La eficiencia de combustión representa la relación entre la energía aprovechada experimentalmente y la energía suministrada por el combustible. Este parámetro permite evaluar el desempeño energético del proceso de combustión desarrollado en el sistema (Transferencia-de-Calor-y-Masa-Yunus-Cengel, n.d.).

La eficiencia de combustión se calculó mediante:

$$\eta_{comb} = \frac{Q_{exp}}{Q_{comb}} * 100\% \quad (16)$$

Donde:

- Q_{exp} : calor experimental [W]
- Q_{comb} : calor suministrado por el combustible [W]

2.20. Eficiencia térmica

La eficiencia térmica representa la relación entre calor útil transferido al agua y la energía total suministrada por el combustible. Este parámetro permite evaluar la capacidad del sistema para transformar la energía química del combustible en energía térmica aprovechable (Transferencia-de-Calor-y-Masa-Yunus-Cengel, n.d.).

La eficiencia térmica se determinó mediante:

$$\eta_{equipo} = \frac{Q_{util}}{Q_{comb}} * 100\% \quad (17)$$

Donde:

- Q_{util} : calor útil transferido al agua [W]
- Q_{comb} : calor suministrado por el combustible [W]

2.21. Pirólisis

El artículo de la autoría de (Ibarra & Santos, 2024) explica el origen de la palabra pirólisis proveniente del griego “*Pyr*” que significa fuego y “*Lysis*” que traduce descomposición y la define como un proceso termoquímico en el que materiales orgánicos se someten a temperaturas elevadas

en ausencia de oxígeno o en una atmosfera inerte, evitando de esta manera su combustión directa. Bajo estas condiciones, los enlaces químicos de los compuestos orgánicos se rompen y el material se descompone en una fase gaseosa rica en hidrocarburos ligeros, una fase liquida constituida por aceites o condensados orgánicos y una fase solida carbonosa conocida como negro de carbón.

En el caso del pirólisis de llantas usadas (Carvajal Escudero, 2026) realizó una investigación en la que se ilustra como en esta materia prima el proceso consiste en la descomposición térmica del caucho y otros componentes orgánicos presentes en el neumático en condiciones sin oxígeno, con el objetivo de generar productos de alto valor energético. Durante este proceso, las cadenas poliméricas del caucho se fragmentan en moléculas más pequeñas que originan un aceite de pirolisis de alto poder calorífico, una fracción gaseosa combustible y un residuo sólido rico en carbono.

2.22. Mecha Capilar

La Real Academia Española (RAE) Define una mecha como. “una cinta tejida de filamentos combustibles, generalmente de algodón, que se pone en las piqueras o mecheros”. (*mecha* | *Definición* | *Diccionario de la lengua española* | RAE - ASALE, s/f) las mechas son elementos que se introducen parcialmente en un depósito de combustible líquido y lo transporta hacia la zona de combustión mediante acción capilar.

En un sistema de combustión, la mecha capilar tiene una importancia fundamental porque regula y estabiliza el suministro de combustible a la llama o a la superficie caliente. Al proporcionar un flujo relativamente uniforme y bien distribuido sobre la zona de evaporación o combustión, la mecha contribuye a mantener una llama estable, a mejorar la atomización o

evaporación del combustible y a reducir problemas como goteos, retrocesos de llama y emisiones incompletas.

2.23. Matriz Pugh

En la realización de proyectos y diseños es de suma importancia dejar la subjetividad de lado, ya que puede generar sesgos que influyan negativamente al resultado esperado, una de las herramientas que facilitan asegurar la objetividad en la toma de decisiones es la Matriz PUGH, también conocida como matriz de decisión controlada o método de convergencia controlada que es una herramienta cuantitativa multicriterio empleada para la evaluación sistemática y objetiva de alternativas, fue creada en la década de los años 1950 por el doctor Stuart Pugh, quien era ingeniero mecánico y profesor de la Universidad de Strathclyde ubicada en Escocia y surgió como respuesta a la necesidad de sistematizar el “diseño total de productos”, el doctor Pugh identificó que las decisiones en ingeniería carecían de un rigor cuantitativo y propuso esta matriz como una evolución del análisis morfológico de Zwicky y termino de formalizar su método en su libro titulado “Total design” publicado en 1990.

La matriz Pugh Consiste en una tabla bidimensional donde las filas representan criterios de evaluación ya sean económicos, técnicos, ambientales, ergonómicos, entre otros y las columnas corresponden a opciones o conceptos a comparar, a los criterios de evaluación es posible agregarles un peso según la importancia del criterio, posteriormente se puntúan en cada una de las opciones, permitiendo obtener puntajes totales ponderados que identifican la alternativa optima de forma estructurada y libre de sesgos subjetivos.

Figura 1.

Matriz Pugh de referencia

Criteria	Optional Importance Weighting	Current Solution	Alternative #1	Alternative #2
Effectiveness	5	0	1	1
Availability of Resources	3	0	0	1
Support from Business	2	0	0	1
Long Term Benefit	2	0	1	0
Time to Implement	4	0	-1	0
Ease to Implement	1	0	0	0
Cost ot Implement	5	0	-1	-1
	Totals	0	-2	5

Nota. Imagen tomada de (*¿Qué es una matriz de Pugh?*, s/f)

3. Proceso Metodológico

3.1. Selección del aceite combustible

La selección de que aceite se empleará como combustible representa una etapa crucial dentro el desarrollo del sistema de combustión, debido a que las propiedades físicas, químicas y energéticas del aceite influirán directamente en el desempeño térmico, la estabilidad de la llama, la eficiencia de la combustión y en general la viabilidad técnica del quemador. En este orden de ideas, se realiza una investigación documental orientada al análisis de las propiedades de diferentes tipos de aceites automotrices y vegetales con potencial de aprovechamiento energético, considerando aspectos como el poder calorífico, viscosidad, composición química, contenido de humedad, facilidad de ignición, disponibilidad y nivel de contaminación asociado a su uso y disposición final.

Posteriormente, con el fin de establecer un proceso de selección estructurado y técnicamente fundamentado, se emplearon herramientas de análisis y toma de decisiones como la matriz Pugh. permitiendo comparar las alternativas de combustible a partir de criterios técnicos como funcionales, relacionando las necesidades del sistema de combustión con las propiedades específicas de cada aceite evaluado.

La implementación de esta herramienta facilita la identificación del aceite con mayor viabilidad para ser utilizado como combustible en el quemador garantizando no solo un adecuado rendimiento energético, sino también condiciones de accesibilidad, bajo costo y potencial de aplicación en comunidades rurales con acceso limitado a gas natural.

3.1.1. Revisión de las propiedades térmicas de cada tipo de aceite

Se realizar revisiones de literatura, buscando información acerca de los componentes que conforman cada tipo de aceite, sus propiedades químicas y físicas como su poder calorífico, que tan contaminantes pueden llegar a ser los productos de su combustión.

3.1.1.1. Aceite vegetal. Aceite vegetal El aceite vegetal usado, representa una alternativa energética viable para aplicaciones de combustión debido a sus propiedades térmicas, elevado poder calorífico y potencial de reutilización. Diversas investigaciones han demostrado que este tipo de aceites poseen características adecuadas para ser empleados en sistemas térmicos y dispositivos de combustión, contribuyendo a la disminución de residuos contaminantes y al aprovechamiento energético de desechos líquidos.

Desde un punto de vista energético, los aceites vegetales presentan valores de poder calorífico incluso cercano a los combustibles líquidos convencionales. Zhao et al. (2020) Determinó que los aceites vegetales dependiendo de su grado de degradación pueden poseer

poderes caloríficos con valores cercanos a los de fuel oil convencional. Asimismo, Abedigamba et al. (2023) evidenció que las mezclas de aceites vegetales presentan una adecuada capacidad de almacenamiento y transferencia de calor, favoreciendo su aplicación en procesos de combustión.

Uno de los aspectos más importantes en la evaluación del aceite usado como combustible corresponde a sus propiedades físicas, especialmente la viscosidad y estabilidad térmica. Los aceites residuales presentan una viscosidad considerablemente mayor que la de combustibles líquidos tradicionales debido a procesos de degradación y polimerización generados durante la fritura. Zhao et al. (2020) indican que la viscosidad del aceite puede ser entre 7 y 20 veces superior a la de combustibles derivados del petróleo, dificultando procesos como la atomización y el encendido. Sin embargo, el mismo estudio demuestra que el precalentamiento del aceite entre 70°C y 90°C reduce significativamente esta viscosidad, mejorando condiciones de combustión.

De manera complementaria, Abedigamba et al. (2023) reportaron que propiedades como la conductividad térmica, la capacidad calorífica y el coeficiente de expansión térmica de los aceites vegetales varían favorablemente con el incremento de temperatura, permitiendo una mejor transferencia de calor y una mayor estabilidad térmica durante el proceso de combustión. Además, mediante análisis termogravimétricos se observó que los aceites comienzan procesos de evaporación aproximadamente entre 182°C y 189°C, lo cual evidencia una estabilidad térmica adecuada para aplicaciones energéticas controladas.

En términos de desempeño energético y ambiental (Zhao et al., 2020) encontraron que el aceite de cocina residual tipo WCO-1 presentó los mejores resultados de combustión, alcanzando eficiencias energéticas de hasta 85.3%. asimismo, el estudio evidenció menores emisiones de material particulado PM_{2.5}, monóxido de carbono y compuestos aromáticos policíclicos en

comparación con combustibles sólidos tradicionales como la biomasa y el carbón. Esto resulta particularmente relevante para aplicaciones rurales, donde el uso de la biomasa y leña continúa siendo una de las principales fuentes de energía doméstica y una causa importante de contaminación domiciliaria.

3.1.1.2. Aceite De motor. El aceite de motor usado representa una alternativa energética con alto potencial para aplicaciones de combustión debido a su elevado contenido energético, disponibilidad y capacidad de reutilización como combustible líquido. Diversas investigaciones han demostrado que los aceites lubricantes residuales pueden emplearse en sistemas de combustión y quemadores, permitiendo aprovechamiento el energético de un residuo altamente contaminante y reduciendo la dependencia de combustibles fósiles convencionales.

De acuerdo con (Gómez et al., 2022), los aceites lubricantes usados contienen aproximadamente en 90% de aceite base y hasta un 10% de aditivos químicos, siendo ampliamente utilizados en motores, compresores, turbinas y diferentes sectores industriales. Debido al gran consumo de lubricantes a nivel mundial, se generan grandes cantidades de residuos de aceite usado, lo cual ha impulsado investigaciones orientadas a su recuperación energética y reutilización como combustible.

Uno de los principales aspectos favorables del aceite de motor usado es su elevado poder calorífico. El estudio reporta valores de poder calorífico inferior cercanos a $45,19 \text{ MJ/kg}$ según (Zhao et al., 2020) valores muy similares a los de combustibles pesados derivados del petróleo. Estas propiedades permiten considerar al aceite de motor usado como un combustible capaz de generar cantidades significativas de energía térmica durante el proceso de combustión.

Sin embargo, el aceite lubricante usado presenta propiedades físicas que dificultan su combustión directa, especialmente su elevada viscosidad. (Gómez et al., 2022) reportan viscosidades de aproximadamente 76.5 cSt a una temperatura de 50°C, lo cual puede generar combustiones incompletas. Por esta razón, el estudio señala que es necesario implementar sistemas de precalentamiento del combustible antes de la combustión, con el fin de reducir la viscosidad y mejorar la pulverización del aceite dentro del quemador.

En cuanto al comportamiento térmico, los resultados experimentales evidenciaron que las mezclas con el aceite de motor usado presentaron mayores temperaturas de radiación de llama en comparación con combustibles pesados convencionales. Además, el estudio determinó que la eficiencia de combustión aumentó conforme se incrementó el porcentaje de aceite de motor usado en la mezcla, analizando eficiencias de hasta 63,5% en combustión de aceite usado puro.

Otro aspecto importante corresponde a las emisiones generadas durante el proceso de combustión. (Gómez et al., 2022) encontraron que la utilización de sistemas de inyección de aire secundario permite reducir significativamente las emisiones de monóxido de carbono, favoreciendo condiciones de combustión más completa. Sin embargo, el estudio también reportó emisiones considerables de NO_x, SO₂ y material particulado fino, especialmente en procesos de combustión sin tecnologías de abatimiento. Esto representa una desventaja ambiental frente a otros combustibles líquidos, ya que el aceite de motor usado contiene residuos metálicos, azufre y compuestos derivados del desgaste del motor y de los aditivos lubricantes.

Desde el punto de vista ambiental, el aprovechamiento energético del aceite de motor usado permite disminuir problemas asociados a su disposición inadecuada. El vertimiento de aceites lubricantes usados sobre el suelo o cuerpos de agua generan contaminación por hidrocarburos y

metales pesados, afectando ecosistemas y fuentes hídricas. En este contexto, su reutilización como combustible representa una alternativa para reducir el impacto ambiental ocasionando por residuos.

Finalmente, el estudio concluye que el aceite de motor usado posee potencial para ser empleado en sistemas de combustión de llama libre, siempre que se implementen condiciones adecuadas de precalentamiento y control de aire para mejorar la eficiencia y reducir las emisiones contaminantes. Por lo tanto, el aceite lubricante residual se puede considerar como una alternativa técnicamente viable como combustible, aunque requiere mayores controles ambientales y operacionales en comparación con otras alternativas de aceites.

3.1.2. Revisión de la facilidad de adquisición de cada tipo de aceite

La accesibilidad y facilidad de adquisición del combustible constituyen factores fundamentales para garantizar la viabilidad técnica, económica y social del quemador, especialmente considerando el enfoque a las comunidades rurales con acceso limitado a gas natural. En este sentido, se realizó una revisión comparativa entre el aceite vegetal usado y el aceite de motor usado, evaluando aspectos relacionados con la accesibilidad y la facilidad de recolección, costos de adquisición y condiciones de aprovechamiento.

En Colombia, el aceite de palma constituye el aceite vegetal de mayor consumo para uso doméstico e industrial, representando aproximadamente el 65% del mercado nacional de aceites comestibles, lo que favorece la generación de aceite vegetal usado en hogares, restaurantes y establecimientos dedicados a la preparación de alimentos (Colombia.com, 2024). Esta condición

permite considerar el aceite vegetal usado como un residuo ampliamente disponible y con alto potencial para su aprovechamiento energético.

Diversos estudios realizados en el país respaldan esta disponibilidad. en un estudio desarrollado en el casco urbano de San José del Guaviare, reportaron que, de una muestra de 17 restaurantes, el 51% consumía entre 3 y 30 L de aceite al mes, el 18% entre 30 y 80 L/mes, el 21% alrededor de 100L/mes y el 10% entre 120 y 150L/mes. Estos resultados evidencian que incluso municipios de tamaño intermedio pueden generar cantidades significativas de aceite vegetal usado, suficientes para abastecer sistemas de combustión de pequeña escala mediante programas de recolección.

Asimismo, el estudio evidencio que una fracción importante del aceite usado continúa siendo dispuesta de manera inadecuada mediante vertimiento al alcantarillado, disposición junto con residuos sólidos o reutilización excesiva, situación que representa un problema ambiental y al mismo tiempo, una oportunidad para su valorización energética mediante procesos de combustión controlada. (Cardenas, 2021)

Por otra parte, el aceite de motor usado también presenta una alta disponibilidad, principalmente en talleres mecánicos, estaciones de servicio y centros de mantenimiento automotriz. Sin embargo, a diferencia del aceite vegetal usado, su adquisición y aprovechamiento requirieren mayores controles ambientales debido a la presencia de metales pesados, hidrocarburos, productos de oxidación y aditivos degradados generados durante el funcionamiento del motor. Estas características hacen necesario implementar procesos de filtrado, almacenamiento y manipulación más rigurosos antes de emplearlo como combustible.

Desde el punto de vista logístico, el aceite vegetal usado presenta ventajas importantes frente al aceite de motor usado, debido a que puede recolectarse directamente en pequeñas cantidades dentro de las comunidades o mediante campañas de recolección en restaurantes y establecimientos comerciales, sin requerir tratamientos especializados previos. En contraste, el aceite lubricante residual generalmente requiere procesos adicionales de acondicionamiento para reducir la presencia de impurezas y minimizar la generación de emisiones contaminantes durante la combustión.

Asimismo, la aceptación social representa otro criterio relevante para la selección del combustible. El aceite vegetal usado suele ser percibido como un residuo domestico de menos peligrosidad, lo que facilita su implementación en proyectos comunitarios. Por el contrario, el aceite de motor usado está catalogado como un residuo peligroso, razón por la cual su utilización demanda mayores medidas de control ambiental y de seguridad.

Finalmente, considerando la disponibilidad reportada en la literatura, la facilidad de recolección, el menor riesgo ambiental asociado a su manipulación y la aceptación social, el aceite vegetal usado fue seleccionado como el combustible de referencia para el desarrollo del prototipo, mientras que el aceite de motor usado se consideró una alternativa técnicamente viable, pero con mayores restricciones para su implementación en comunidades rurales.

3.2. Matriz Pugh para la determinación del aceite

Para este proyecto se empleará la esta herramienta para seleccionar la alternativa más optima de las dos opciones planteadas para usarse como combustible para el quemador que son el aceite de cocina usado (ACU) y el aceite de motor usado (AMU) teniendo como principales criterios de selección el valor calorífico que podrían entregar cada una de las alternativas, el

apartado económico, la facilidad de transportarlos, que tan seguros era transportarlos, la complejidad que representaría tratarlos y prepararlos para utilizarlos como combustible y la contaminación que se generaría al quemarlos. Obteniendo la siguiente Matriz.

Tabla 1.

Matriz Pugh para la determinación de aceite combustible

CRITERIO	VALOR	AMU	ACU
VALOR CALORIFICO	0,1	4	4
ECONOMIA	0,15	3	5
FACILIDAD DE TRANSPORTE	0,1	3	4
SEGURIDAD	0,25	2	4
FACILIDAD DE TRATAMIENTO	0,15	1	4
CONTAMINACIÓN	0,25	1	4
TOTAL	1	2,05	4,15

Según la matriz Pugh desarrollada anteriormente se evidencia en como el ACU se establece con gran diferencia como la mejor alternativa para ser usado en un quemador de aceite usado, siendo superior en la mayoría de los criterios de selección mostrándose como una combustible, más económico, seguro, fácil de tratar y transportar además de evidenciar ser más accesible económicamente para el usuario.

Para el apartado de poder calorífico ambos aceites obtuvieron un puntaje de 4 debido a que poseen valores de poder calorífico cercanos, en el estudio realizado por Kipkorir et al. (2021) se muestra que el valor de HHV del aceite de motor usado destilado puede rondar entre los

39,61MJ/kg y los 42,46MJ/kg mientras que (Fassinou, 2012) en su estudio utilizando una bomba calorimétrica obtuvo datos en los que el HHV del aceite de palma de cocina usado da un valor de 39,11MJ/kg.

En el aspecto económico el ACU se destacó por encima del AMU debido a que el aceite de cocina usado es un activo más común tanto en los hogares como en los restaurantes dentro de las comunidades, factor que facilita la obtención gratuita, mientras que en el caso del AMU se está regulado como residuo peligroso por lo que se distribuye por empresas como ATICA que cobran por la distribución del aceite usado(*Atica | Gestión de Residuos | Aguas | Valorización, s/f*).

Para el criterio de la Facilidad de transporte nuevamente es el ACU que se impone sobre el AMU debido a que si bien es una sustancia que puede resultar delicada a la hora de transportar debido a derrames o fugas de los recipientes estos casos no representarían un riesgo para los individuos que la transportan, en cambio con el AMU y su transporte está sujeto al decreto 1609 de 2002 que reglamenta el manejo y transporte terrestre, estableciendo requisitos de seguridad como equipos y señalización.

En el criterio de seguridad el AMU nuevamente se ve ampliamente superado por el ACU debido a que se ha demostrado que la exposición al aceite de motor usado puede traer complicaciones a la salud humana ya que la exposición a este material puede derivarse en enfermedades respiratorias, cutáneas y en algunos casos hasta cancerígenas (*¿Cómo debe manipularse el aceite de motor usado? - Agro-Costa S.A.S - Repuesto de Maquinaria Pesada, s/f*) mientras que en el caso del ACU no contiene componentes nocivos para la salud humana.

Para la facilidad de transporte se ve una vez más que el ACU cuenta con un mayor puntaje debido a que para su quema solo hace falta realizar un filtrado para asegurarse de que no se

encuentren residuos sólidos de comida dentro de él mientras que el AMU debe pasar por procesos como a sedimentación, filtración y centrifugación (Efig, s/f-a) los cuales no son posibles de realizar de manera completamente doméstica.

En el apartado de contaminación es el ACU la alternativa que se impone debido que el aceite usado de motor suele contener metales pesados en él, además de que su quema produce varios gases perjudiciales y contaminantes como lo son el NO_x , SO_x , entre otros que favorecen el calentamiento global.(Efig, s/f-b).

Ya realizado el proceso de selección del combustible, se determinó que el aceite de cocina usado será la opción óptima para el desarrollo del presente proyecto.

Dentro de la variedad existente de aceites de cocina se realizó una investigación con el fin de determinar qué tipo de aceite de cocina seria la materia prima de referencia para el desarrollo de este proyecto consultando costos y la popularidad de consumo en Colombia.

Una vez realizada esta investigación se obtuvo como resultado que el aceite de palma seria la opción ideal para el desarrollo del proyecto debido a ser el tipo de aceite de mayor consumo en Colombia, adicionalmente durante una consulta exploratoria realizada en establecimientos de preparación de alimentos dentro del área metropolitana de Bucaramanga, se evidencio que el aceite de palma es el aceite de mayor utilización debido a su disponibilidad y menor costo frente a otros aceites vegetales.

3.3. Diseño de un sistema de combustión accesible y de bajo costo

3.3.1. Identificación de necesidades mediante Matriz QFD

Para la realización correcta del diseño de cualquier producto es de suma importancia reconocer cuales son las necesidades y especificaciones del cliente que el producto debe satisfacer, para asegurarse de cumplir con esta finalidad se emplean metodologías como la Matriz QFD.

El Despliegue de la función de calidad o QFD por sus siglas en inglés (Quality Function Deployntment) es una metodología sistemática que traduce las necesidades del cliente en especificaciones técnicas que el producto que se diseña debe poseer mediante la “casa de calidad” matriz correlacionada donde las filas representan el llamado “QUE” que representan las necesidades del cliente y las columnas “COMO” que son los parámetros ingenieriles con un techo que visualiza interrelaciones técnicas las correlaciones fuertes, medias y débiles generan prioridades absolutas cuantitativos para el diseño optimo. Esta metodología fue desarrollada en 1966 por Yoji Akao como evolución de la matriz de calidad Nippon Densokei, se perfecciono en el año 1972 para aplicarla en la construcción naval y adoptó Toyota en el año 1978 reduciendo ciclos de diseño. Luego la metodología fue exportada a USA 1983, siendo aplicada por empresas como Ford o GM, siendo formalizada ASQ 1987 y fue estandarizada en la ISO 9001:2015 y APQP automotriz. (Yacuzzi, s. f.).

Matriz QFD de referencia

Nota. Imagen tomada de (*CASA DE LA CALIDAD (QFD), O MATRIZ DE CALIDAD*, s/f)

Inicialmente, se efectuaron visitas a diferentes viviendas del municipio de Capellanía, Cundinamarca, donde fue posible observar el funcionamiento de estufas tradicionales de leña y carbón empleadas para la preparación de alimentos. Durante estas visitas se registraron evidencias fotográficas con el propósito de documentar las condiciones de operaciones de estos sistemas,

identificando aspectos como la generación de humo, la acumulación de residuos de combustión y las características generales de su funcionamiento.

La figura 3 presenta dos estufas tradicionales observadas durante las visitas de campo. Estas observaciones permitieron conocer de manera directa las condiciones de uso de este tipo de sistemas y sirvieron como base para el diseño del prototipo.

Figura 3.

Estufas tradicionales de leña y carbón



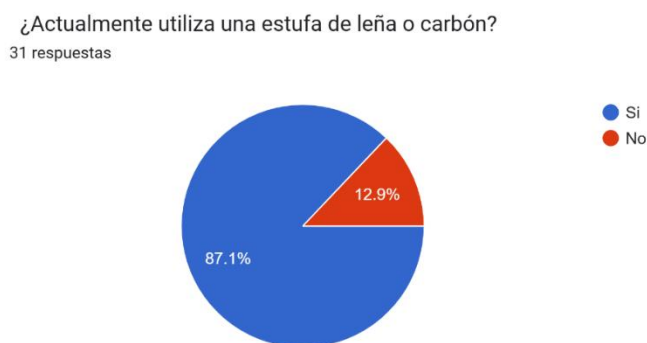
Con el propósito de complementar la información obtenida durante las visitas de campo, se diseñó y se aplicó una encuesta mediante la plataforma Google Forms, obteniéndose un total de 31 respuestas. El cuestionario estuvo orientado a identificar aspectos relacionados con el uso de estufas de leña y de carbón, la frecuencia de utilización, las afectaciones ocasionadas por el humo y el nivel de aceptación de una alternativa de combustión basada en aceite de cocina usado.

En la figura 4, los resultados evidenciaron que el 87.1% de los participantes utiliza actualmente una estufa de leña o carbón, mientras que únicamente el 12.9% indicó no emplear este

tipo de sistema. Este resultado evidencia que las estufas tradicionales de leña y carbón continúan siendo ampliamente utilizadas para la preparación de alimentos, especialmente en zonas rurales, lo que justifica el desarrollo de alternativas que permiten mejorar las condiciones de combustión y disminuir las emisiones contaminantes.

Figura 4.

Uso de estufas de leña y carbón

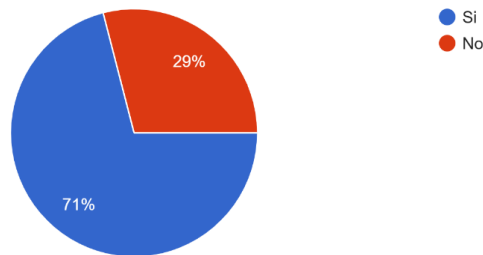


Respecto a las afectaciones ocasionadas por el humo, en la figura 5, el 71% de los encuestados manifestó que al menos un integrante de su hogar presenta molestias derivadas de la exposición a los gases y partículas generadas durante la combustión, mientras que el 29% indicó no presentar este tipo de inconvenientes. Estos resultados ponen de manifiesto que la emisión de humo constituye una de las principales problemáticas asociadas al uso de estufas tradicionales, afectando la calidad del aire en el interior de las viviendas y representando un riesgo para la salud de sus habitantes.

Figura 5.

Afectaciones por exposición de humo

¿Algún integrante de su hogar presenta molestias por el humo?
31 respuestas



En cuanto a la aceptación de la propuesta en la figura 6, el 64.5% de los participantes manifestó que utilizaría un quemador alimentado con aceite de cocina usado como combustible alternativo, mientras que el 32.3% respondió que posiblemente lo utilizaría y únicamente el 3.2% indico que no estaría dispuesto a emplearlo. Estos resultados reflejan una alta aceptación de la propuesta y evidencian el interés de los usuarios por alternativas que reduzcan la generación de humo y aprovechen un residuo domestico como fuente de energía,

Figura 6.

Aceptación del quemador propuesto

Si existiera un quemador que utilizara aceite de cocina usado en lugar de leña o carbón, ¿estaría dispuesto a utilizarlo?
31 respuestas

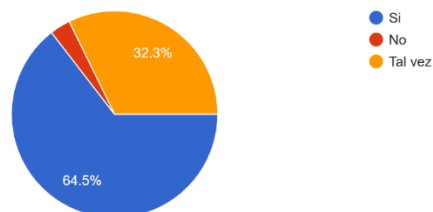


Tabla 2.

Matriz QFD requerimientos de diseño del quemador

1: low, 5: high Customer importance rating	Functional Requirements (How's) → Customer Requirements - (What's) ↓	SISTEMA DE ALIMENTACI ON DE ACIETE	SISTEMA DE ALIMENTACI ON DE AIRE	GEOMETR IA DE LA CAMARA	MATERIAL DE LA CAMARA	ASLAMI ENTO TERMIC O
4	BAJO CONSUMO	9	9	1	1	0
3	EFICIENCIA TERMICA	1	3	3	3	9
2	FACIL ENCENDIDO	0	0	0	0	0
5	PRODUCTO ECONÓMICO	9	9	3	9	9
4	FACIL MANTENIMIENTO	3	3	3	3	1
3	PORTABILIDAD	9	9	9	9	3
4	POCA GENERACIÓN DE HUMO	3	9	0	0	0
5	SEGURIDAD	3	3	9	9	9
Technical importance score		150	180	112	142	130
Importance %		21%	25%	16%	20%	18%
Priorities rank		2	1	5	3	4

La información recopilada mediante las visitas de campo y la encuesta permitió identificar las principales necesidades de los usuarios, entre las que se destacan la reducción de la emisión de humo, la disminución de las afectaciones respiratorias, la seguridad durante la operación, la facilidad de uso y el aprovechamiento de un combustible alternativo. Estos requerimientos constituyeron la base para la construcción de la Matriz QFD, herramienta empleada para transformar las necesidades del usuario en especificaciones técnicas de diseño.

Como se observa en la matriz QFD, las necesidades más importantes para el usuario corresponden a que el sistema sea económico y seguro, obteniendo el mayor nivel de importancia dentro de los criterios evaluados, asimismo, aspectos como el bajo consumo de combustible, la facilidad de mantenimiento y la baja generación de humo presentaron una alta relevancia para el diseño del quemador. Por otra parte, características como la eficiencia térmica y la portabilidad

obtuvieron una importancia intermedia, Mientras que el fácil encendido fue el criterio de menor prioridad.

Una vez definidas las necesidades del usuario (“QUE”), estas fueron relacionadas con los parámetros ingenieriles (“COMO”) correspondientes al sistema de alimentación de aceite, sistema de alimentación de aire, geometría de la cámara de combustión, material de fabricación y aislamiento térmico del sistema. El análisis de correlación permitió identificar que el sistema de alimentación de aire posee la mayor importancia técnica, debido a su influencia directa sobre la eficiencia térmica, la estabilidad de combustión y la reducción de emisiones contaminantes.

De igual manera, el sistema de alimentación de aceite presentó una alta prioridad técnica al ser el encargado de garantizar un suministro estable y controlado de combustible hacia la cámara de combustión. Asimismo, la selección de material de fabricación y el aislamiento térmico resultaron relevantes a su influencia sobre la seguridad, resistencia a altas temperaturas y reducción de pérdidas de calor del sistema.

Finalmente, aunque la geometría de las cámaras de combustión presenta una menor prioridad Dentro de la matriz QFD Continúa siendo un parámetro importante a su influencia sobre la distribución del flujo de aire y el comportamiento de la combustión dentro del quemador.

En términos generales. Los resultados obtenidos mediante la matriz QFD permitieron concluir que el diseño y el quemador debe enfocarse principalmente en garantizar un adecuado suministro de aire y combustible, así como en seleccionar materiales que aseguren una operación eficiente, segura y térmicamente estable.

4. Diseño del quemador

Para el diseño del quemador se desarrolló a partir del análisis de dos alternativas orientadas al aprovechamiento energético de aceite usado como combustible. Durante el proceso de selección se consideraron criterios relacionados con facilidad de fabricación, costos de mantenimiento, estabilidad de combustión y seguridad operacional.

4.1. Alternativa 1

La primera alternativa de diseño corresponde a un quemador con cámara de combustión cilíndrica vertical y suministro de aire forzado. La estructura principal está conformada por la cámara cilíndrica que permite la zona de combustión y mantener una correcta concentración de temperatura durante el proceso. La cámara de combustión podría fabricarse con acero ASTM A36, material ampliamente utilizado en aplicaciones industriales debido a su adecuada resistencia mecánica, buena soldabilidad y facilidad de fabricación por procesos de corte y conformado. La parte inferior dispone la conexión a un ventilador encargado de suministrar el aire para la combustión, el aire impulsado por el ventilador ingresa al quemador por la parte inferior y asciende a través de una tubería ubicada en el interior de la cámara. Esta tubería podría fabricarse utilizando tubería de acero al carbono ASTM A53, material utilizado en sistema de conducción de fluidos y permite dirigir el flujo de aire hacia la zona de combustión, favoreciendo la mezcla entre aire y combustible y obteniendo una estabilidad de la llama.

En la parte superior del sistema se ubica un depósito asignado al almacenamiento del aceite usado que será utilizado como combustible. Este depósito podría construirse en acero al carbono laminado, material adecuado para la fabricación de recipientes metálicos mediante procesos de soldadura y que presenta compatibilidad con combustibles líquidos. El suministro del aceite hacia

la cámara de combustión es un sistema de alimentación por gravedad, lo que permite que el combustible descienda hacia la zona interna del quemador de forma controlada.

Para evitar que el aceite se acumule directamente en el fondo de la cámara de combustión, se incorpora un plato cóncavo en la zona central del sistema, el cual podría fabricarse en acero inoxidable AISI 304, material que presenta buena resistencia a la corrosión y al contacto con combustibles líquidos, además soporta temperaturas elevadas dentro del proceso de combustión. Cuando el aceite entra en contacto con el plato, este se calienta progresivamente, lo que provoca vaporización parcial del combustible. Este proceso favorece la mezcla entre los vapores del aceite y el aire ascendiente proveniente del ventilador, generando condiciones adecuadas para el desarrollo de la combustión dentro de la cámara.

Finalmente, los gases calientes generados durante el proceso de combustión ascienden hacia la parte superior del quemador, donde son evacuados al exterior a través de la rejilla en la parte superior. Esta rejilla se podría fabricar con acero inoxidable resistente a altas temperaturas, permitiendo la exposición directa a los gases calientes generados durante la combustión. Este flujo de gases permite la circulación dentro de la cámara y contribuye a la estabilidad de funcionamiento del equipo.

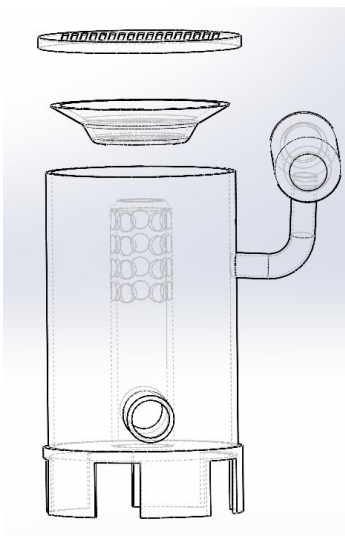
Aunque esta alternativa presenta un funcionamiento conceptual adecuado, su implementación práctica presenta algunas limitaciones relacionadas con condiciones térmicas y de operación. Al tratarse de una estructura fabricada mayoritariamente en acero, la cámara de combustión y los componentes internos estarían expuestos de forma directa a altas temperaturas durante tiempos prolongados de funcionamiento, lo que podría generar fenómenos de deformación térmica, fatiga del material y un deterioro progresivo en algunas partes del sistema.

Adicionalmente, el uso de aceite puede implicar la presencia de residuos, compuestos corrosivos que con el tiempo podrían favorecer procesos de corrosión o acumulación de depósitos en los componentes metálicos internos del quemador.

Asimismo, la integración estructural del depósito de almacenamiento directamente sobre la cámara de combustión, junto con la presencia de elementos internos como la tubería de conducción de aire y el plato cóncavo receptor del combustible, genera que el acceso a ciertos componentes resulta limitado. Esta condición puede dificultar las actividades de limpieza y mantenimiento especialmente en zonas internas donde tienen acumularse residuos del producto de la combustión. de igual manera, el empleo predominante de elementos metálicos implica mayores requerimientos de material y procesos de fabricación como corte, conformado y soldadura. Esta alternativa resulta funcional desde el punto de vista conceptual, presenta limitaciones relacionadas con durabilidad, mantenimiento y costos de fabricación, factores que deber ser considerados en la evaluación de viabilidad frente a la alternativa 2.

Figura 7.

Alternativa de diseño 1



4.2. Alternativa 2

La segunda alternativa de diseño corresponde a un quemador de aceite desarrollado con el propósito de mejorar aspectos relacionados con la operación, eficiencia térmica y facilidad de mantenimiento del sistema. Esta propuesta presenta una disposición estructural donde los componentes principales se encuentran distribuidos de manera independiente, lo que permite un acceso más sencillo para labores de inspección y limpieza.

Este diseño, la cámara de combustión está ubicada en la parte inferior del sistema y corresponde un recipiente cilíndrico de mayor tamaño. Esta cámara está diseñada para funcionar como un horno, por lo que se plantea la utilización de materiales refractarios que permitan soportar altas temperaturas y reducir las pérdidas de calor hacia al exterior. Para ello, se contempla inicialmente un cilindro de acero, que constituye la estructura principal de la cámara y proporciona resistencia mecánica necesaria para el sistema. Sobre la superficie exterior del cilindro se dispondría una capa de lana de vidrio, cuya función sería actuar como material aislante y reducir transferencia de calor hacia el exterior. Finalmente, sobre la capa de lana de vidrio se aplicaría una capa de mortero refractario, que permitiría proteger el aislamiento y aportar resistencia frente a las condiciones térmicas del sistema. De esta manera, la configuración propuesta por el cilindro de acero, lana de vidrio y mortero refractario, permite integrar resistencia mecánica, aislamiento térmico y protección constituyendo una solución viable y económica para la construcción de la cámara de combustión.

En la parte superior del diseño se encuentra el tanque de almacenamiento del aceite, el cual se instala sobre una estructura de soporte independiente. Desde este tanque, el combustible es conducido hacia la cámara de combustión mediante una tubería de suministro, permitiendo que el

aceite descienda por gravedad hasta el interior de la cámara principal. Este tipo de alimentación presenta ventajas importantes ya que simplifica al sistema al no requerir bombas o equipos para el transporte del combustible, reduciendo costos y como la complejidad para el mantenimiento.

Con el fin de controlar el flujo de combustible, el sistema contempla la instalación de una válvula en la salida del tanque de almacenamiento, el cual permite regular la cantidad de aceite que ingresa a la cámara de combustión. Esta alternativa representa una solución técnica viable y funcional, ya que integra un sistema de combustión con materiales adecuados para altas temperaturas, un método de alimentación de combustible sencillo mediante gravedad y una estructura que favorece a la accesibilidad y mantenimiento del equipo. Estas características contribuyen a que es un diseño más eficiente, económico y práctico para su implementación.

Figura 8.

Alternativa de diseño 2

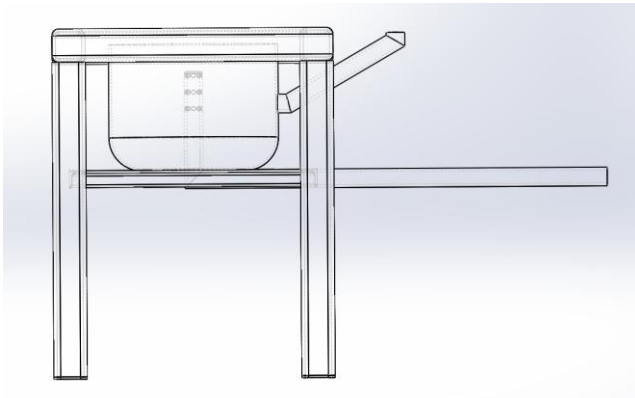


Tabla 3.

Matriz Puch Para la selección de alternativa

CRITERIO	VALOR	ALTERNATIVA 1	ALTERNATIVA 2
SEGURIDAD	0,4	4	4
FACILIDAD DE LIMPIEZA	0,15	4	5
SIMPLICIDAD DE USO	0,5	4	4
FACILIDAD DE ALIMENTACION	0,2	3	4
TOTAL	1,25	4,8	5,15

Con el propósito de seleccionar la alternativa de diseño más adecuada para el desarrollo del quemador, se empleó nuevamente la matriz Pugh como herramienta de apoyo para la toma de decisiones. Que permitió comparar de manera objetiva las dos alternativas propuestas mediante diferentes criterios considerados fundamentales para el correcto funcionamiento del equipo.

Se tuvieron en cuenta cuatro criterios definidos de acuerdo con los requerimientos establecidos por los potenciales usuarios:

- **Seguridad (0,4):** Este criterio tiene asignado el mayor peso debido a que el quemador estará operando a altas temperaturas por lo que se considera que minimizar riesgos es el aspecto más importante del diseño

- **Facilidad de aseo (0,15):** Considerando los posibles residuos que se pueden generar durante la combustión, es indispensable que el diseño permita realizar labores de limpieza de forma rápida y sencilla.
- **Simplicidad de uso (0,25):** Se buscó que el quemador pueda ser operado fácilmente por cualquier usuario, especialmente en zonas rurales donde no siempre se dispone de personal con conocimientos técnicos especializados.
- **Facilidad de alimentación (0,2):** Se evaluó la facilidad con la que el combustible puede suministrarse al quemador, procurando un proceso práctico, seguro y continuo durante la operación.

Una vez realizados los cálculos de la matriz se observa que la alternativa 1 obtuvo una puntuación total de 3,8, mientras que la alternativa 2 alcanzó una puntuación de 4,2 evidenciando un mejor desempeño global, sin embargo, se evidencia que presentan un nivel de seguridad y simplicidad de uso equivalente, la alternativa 2 sobresale por presentar una mayor facilidad de limpieza y alimentación de combustible.

En consecuencia, se seleccionó la alternativa 2 como la solución de diseño para el desarrollo del quemador de aceite usado, ya que satisface de en mayor medida los criterios de evaluación establecidos.

4.3. Elección de ventilador

Dentro del sistema del quemador de aceite, el suministro de aire hacia la cámara de combustión se realiza mediante un turbocompresor de la marca Holset, accionado por un motor eléctrico acoplado mecánicamente. Aunque este tipo de equipo está diseñado para motores de combustión interna, en el sistema del quemador se emplea como un dispositivo de suministro aire.

El turbo compresor utilizado fue tomado del laboratorio 314 de la escuela de ingeniería mecánica de la universidad industrial de Santander, lo que permitió su acoplamiento al sistema sin requerir la adquisición de equipos adicionales.

La selección del turbocompresor se define en función de su capacidad de generar flujo de aire a presión en un rango adecuado para procesos de combustión a pequeña escala. Su diseño, se permite hacer la variación de velocidad de rotación y así obtener un suministro continuo de aire que facilita la mezcla con el combustible. En comparación con sopladores, esta alternativa representa una solución de menor costo y fácil implementación.

El sistema dispone de dos líneas de alimentación independientes, una para el aire impulsado por el turbocompresor y la otra para el aceite, suministrado desde un tanque de alimentación. Ambas corrientes convergen en la cámara de combustión, donde la interacción entre el flujo de aire y el combustible genera la formación de la mezcla aire-combustible. Este aporte de aire forzado permite mejorar la estabilidad de la llama y la eficiencia de la combustión, al favorecer una distribución más homogénea del combustible.

Considerando lo anterior, la selección del turbocompresor como sistema de aire representa una alternativa funcional para aplicaciones experimentales, permitiendo generar condiciones de combustión con aire forzado sin recurrir a equipos de mayor costo y complejidad.

Figura 9.

Equipo seleccionado para el suministro de aire



4.4. Creación de planos en software SolidWorks

Para el desarrollo del sistema de combustión se empleará el software de diseño asistido por computadora SolidWorks, mediante el cual se elaboran los planos técnicos de fabricación y ensamblaje del quemador. Estos planos incluirán dimensiones, geometrías y especificaciones necesarias para la construcción física del sistema, permitiendo representar de manera detallada cada uno de los componentes que conforman el quemador. Asimismo, los planos facilitarán la correcta interpretación del diseño y servirán como base para los procesos de manufactura y montaje del prototipo.

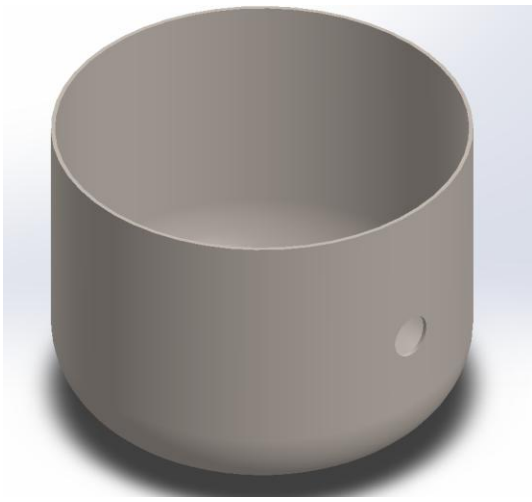
4.4.1. Modelado de piezas en software SolidWorks

Inicialmente se realizó el modelado tridimensional de la cámara de combustión, componente principal del sistema encargado de contener el proceso de combustión y la generación de energía. Para el diseño se seleccionó una geometría cilíndrica favoreciendo una distribución uniforme de temperatura y facilitando la circulación interna de los gases calientes generados durante la combustión.

Este modelado permitió definir las dimensiones preliminares de la cámara y la proporción de sus medidas. Adicional a esto, facilitó la ubicación del orificio donde se instalaría la tubería de alimentación de combustible, definiendo también el material elegido para su fabricación acercando al modelo visualmente a la idea que se tiene para el prototipo.

Figura 10

Modelo CAD Cámara de Combustión

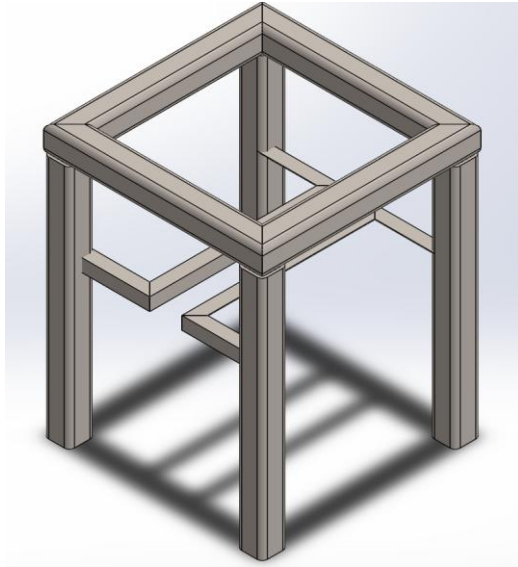


Posteriormente, se realizó el modelado del sistema estructural encargado de soportar tanto la cámara de combustión como las piezas ensambladas a ella. Proporcionando estabilidad mecánica al quemador durante su funcionamiento. La estructura fue diseñada mediante perfiles metálicos de geometría cuadrada fabricados en acero inoxidable. Buscando garantizar resistencia estructural, estabilidad y facilidad de ensamblaje.

Este soporta también permite dar altura al sistema del suelo, aumentando su ergonomía al proporcionar una postura más cómoda para el usuario y facilitando el acceso a los componentes inferiores del sistema durante labores de mantenimiento y operación.

Figura 11

Modelo CAD Sistema Estructural

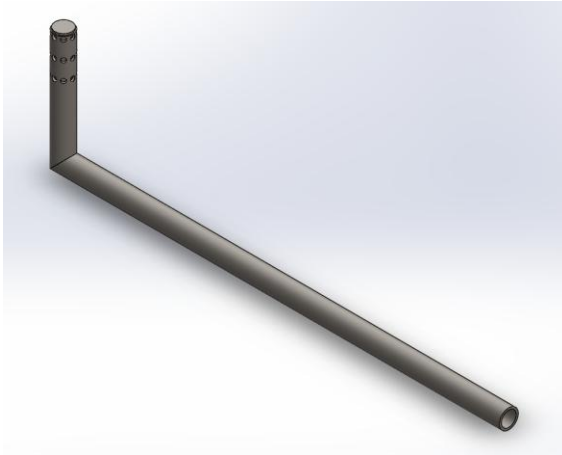


Continuando con el proceso de modelado, se realizó el diseño de la tubería encargada del suministro de aire hacia el interior de la cámara de combustión. Este componente fue diseñado para permitir el ingreso de aire forzado proveniente del sistema de ventilación, con el objetivo de mejorar la mezcla aire-combustible y favorecer una combustión más eficiente y estable.

Esta tubería posee diversos orificios por los cuales saldrá el aire de alimentación aportando oxígeno que mejoraran las condiciones de oxidación del combustible dentro de la cámara.

Figura 12

Modelo CAD Tubería de Suministro de Aire



Finalmente, el último de los componentes a modelar consiste en la tubería de alimentación de aceite. Este sistema fue diseñado para permitir el ingreso del combustible por gravedad desde la parte superior del quemador, simplificando el funcionamiento general del sistema y reduciendo la necesidad de equipos auxiliares de bombeo.

El modelado permite definir la ubicación y alimentación de combustible, definiendo la pendiente que poseerá la tubería favoreciendo a un flujo suave y constante.

Figura 13

Modelo CAD Tubería Alimentación de Aceite



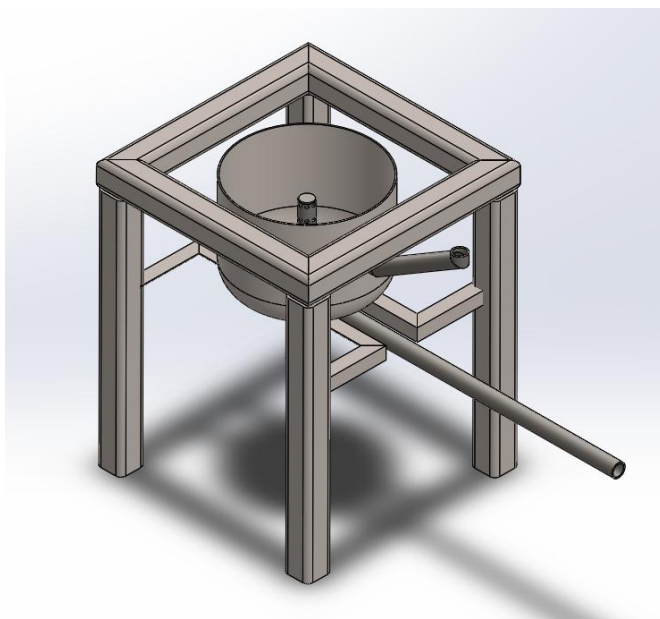
4.4.2. Ensamble de piezas en SolidWorks

Una vez realizado el modelado individual de cada uno de los competentes del sistema de combustión, se procedió a desarrollar el ensamblaje virtual del quemador mediante el software SolidWorks. Esta etapa permitió integrar la cámara de combustión, la estructura de soporte, las tuberías de alimentación de aire y combustible dentro de un único modelo tridimensional, facilitando la visualización general del funcionamiento y disposición del sistema.

Este ensamblaje virtual permitió verificar la compatibilidad geométrica entre las piezas modeladas, verificando posibles interferencias, errores dimensionales o posibles problemas de acoplamiento antes de la fabricación física del prototipo.

Figura 14

Modelo CAD Ensamblaje Sistema de Combustión



4.5. Evaluación de diseño mediante construcción

4.5.1. *Análisis y selección de materiales*

La selección de materiales para la construcción del quemador se realizó considerando las condiciones de operación a las que estarán sometidos sus diferentes componentes. Debido a la presencia de una zona de combustión, los principales criterios considerados fueron la resistencia a altas temperaturas, resistencia a la oxidación y corrosión, Corrosión. Comportamiento frente a ciclos térmicos, propiedades mecánicas, soldabilidad, disponibilidad comercial y costo.

Inicialmente se consideraron alternativas como el acero al carbono ASTM A36, acero inoxidable AISI 304 y acero inoxidable AISI 316.

El acero al carbono ASTM A36 Representa una alternativa favorable desde el punto de vista económico y de fabricación, debido a su amplia disponibilidad, buena soldabilidad y propiedades mecánicas adecuadas para aplicaciones estructurales. Sin embargo, su resistencia a la oxidación y corrosión es inferior a la de los aceros inoxidable, lo cual constituye una desventaja para una cámara sometida repetidamente a calentamiento y productos de combustión.

Por otra parte. El acero inoxidable AISI 304 Representa una mayor resistencia a la corrosión y oxidación, además de unas características de conformabilidad y soldabilidad. Outokumpu Señala que los aceros de esta familia presentan buena resistencia a la corrosión en una amplia variedad de ambientes y son utilizados en numerosas aplicaciones industriales debido a la combinación de propiedades mecánicas y facilidad de fabricación (Outokumpu, 2026)

El AISI 316 ofrece una resistencia a la corrosión superior al AISI 304 La incorporación del Moliteno en su composición, por lo que resulta. Especialmente favorable cuando existe exposicion ambientes químicos más agresivos. Sin embargo, para la Cámara de combustión propuesta, esta mayor resistencia puede no representar una ventaja suficientemente significativa Frente al incremento en el costo del material.

A partir de esas características, el AISI 304 Se identifica como la alternativa más conveniente para la fabricación de la Cámara de combustión, al proporcionar un equilibrio entre resistencia a la oxidación y corrosión, comportamiento térmico, soldabilidad y disponibilidad. El AISI 316 Podría proporcionar una mayor resistencia a la corrosión, pero sus prestaciones adicionales no resultan indispensables para las condiciones previstas del prototipo.

4.5.2. Obtención de Materiales

El sistema propuesto está conformado por un conjunto de elementos que permiten el almacenamiento, conducción y combustión del aceite. Su funcionamiento depende de la interacción entre cada uno de sus componentes y de las propiedades de los materiales seleccionados para soportar las condiciones de operación del quemador.

La selección de materiales y dimensiones se realizó considerando factores como la facilidad de fabricación, la disponibilidad comercial y los costos asociados. A continuación, se describen los principales elementos que conforman el sistema.

4.5.2.1. Cámara de combustión. La cámara de combustión es el componente principal del quemador, ya que en su interior desarrolla el proceso de combustión del aceite y se genera la energía térmica necesaria para el funcionamiento del sistema. Su diseño fue orientado a proporcionar una combustión estable, favorecer la mezcla aire- combustible y soportar las altas temperaturas durante la operación.

La cámara presenta una geometría cilíndrica fabricada en acero inoxidable, con un diámetro de 20 cm, altura de 15 cm y un espesor de pared de 2mm. Estas dimensiones fueron seleccionadas buscando un volumen adecuado que permitiera el desarrollo de la llama y una correcta interacción entre el flujo de aire y el combustible, manteniendo al mismo tiempo un diseño compacto y de fácil construcción.

El acero inoxidable fue seleccionado por su resistencia a la corrosión y oxidación ocasionadas por la exposición continua a gases calientes y residuos de combustión. Además, presenta buena resistencia mecánica y estabilidad frente a cambios de temperatura, reduciendo el

riesgo de deformaciones durante el funcionamiento del quemador. Su conductividad térmica, comprendida entre 10 y 30 W/m*K, contribuye a limitar la transferencia de calor hacia la superficie externa y favorecer la conservación de energía dentro de la cámara. Asimismo, facilita las labores de limpieza y mantenimiento debido a su resistencia al desgaste y acumulación de residuos

Con el fin de reducir las pérdidas térmicas, la superficie externa fue recubierta con una capa de fibra de vidrio de 1.5 cm de espesor. Este material presenta una conductividad térmica entre 0.035 y 0.045 W/m*K, lo que disminuye significativamente la transferencia de calor hacia el ambiente y permite conservar temperaturas elevadas dentro de la cámara. Adicionalmente, posee buena resistencia térmica, bajo peso y estabilidad química, características que favorecen su uso como aislante. Sobre la fibra de vidrio se aplicó un recubrimiento de mortero cuya función principal es proporcionar protección mecánica al aislamiento y aumentar la rigidez del conjunto. Este recubrimiento protege la fibra de vidrio frente a posibles daños durante la operación y complementa el aislamiento térmico de la cámara.

En la parte inferior del cilindro se incorporó el sistema de suministro de aire mediante una unión hembra de acero al carbono de $\frac{3}{4}$ de pulgada soldada a la superficie de la cámara. Este accesorio permite realizar conexiones roscadas, facilitando el montaje, desmontaje y mantenimiento del sistema. Internamente se conectó un niple de acero al carbono de $\frac{3}{4}$ de pulgada y 13 cm de longitud, mientras que externamente se instaló un codo para conectar la cámara con la tubería de suministro de aire.

En el extremo del niple se colocó un tapón hembra y se realizaron perforaciones circulares de diferentes diámetros con el fin de distribuir uniformemente el flujo de aire dentro de la cámara y

favorecer la mezcla homogénea entre el aire y el combustible, mejorando estabilidad de la llama y el proceso de combustión.

Finalmente, el combustible ingresa mediante una tubería de acero al carbono de 3/8 de pulgada soldada, lateralmente a la cámara con una inclinación de 45°. esta configuración permite el flujo del aceite por gravedad hacia el interior del sistema, garantizando una alimentación continua y simplificando el mecanismo de suministro de combustible.

Figura 15.

Cámara de combustión fabricada en acero inoxidable.



4.5.2.2. Sistema de suministro de aire. El sistema de suministro de aire fue diseñado para transportar el flujo generado por el turbocompresor hacia la cámara de combustión, proporcionando oxígeno necesario para el proceso de combustión y favoreciendo una mezcla homogénea entre el aire y el combustible. Un suministro adecuado de aire contribuye a mejorar la estabilidad de la llama, incrementar la eficiencia térmica y reducir la formación de residuos asociados a una combustión incompleta.

La conexión entre la línea de aire y la cámara de combustión se realizó mediante un codo de acero al carbono de $\frac{3}{4}$ de pulgada acoplado a la unión hembra instalada en la parte inferior de la cámara. A partir de este componente se conectó a una tubería de agua $\frac{3}{4}$ de pulgada y 60 cm de longitud, encargada de conducir el flujo de aire desde el turbo compresor hasta la cámara. La selección de estos elementos se realizó considerando su resistencia mecánica, facilidad de instalación y disponibilidad comercial.

El flujo de aire fue suministrado por un turbocompresor cuya salida dispone de una válvula tipo NTP de una pulgada con una inclinación aproximada de 30° . Debido a esta configuración, fue necesario incorporar un sistema de adaptación para realizar la transición entre la salida del equipo y la línea de conducción de $\frac{3}{4}$ de pulgada.

Para ello se utilizó un conjunto conformado por un niple de acero al carbono de 1 pulgada y 5 cm de longitud, una unión galvanizada de 1 pulgada para facilitar desmontaje durante labores de mantenimiento, un buje reductor de 1 a $\frac{3}{4}$ de pulgada y un niple de $\frac{3}{4}$ de pulgada y 5 cm de longitud para completar la conexión con la tubería principal.

Adicionalmente, se empleó conduflex blanco como elemento flexible entre el sistema de adaptación y la tubería de conducción. Este componente permitió reducir esfuerzos sobre las uniones metálicas y facilitar la conexión entre elementos con diferentes orientaciones.

Finalmente, todas las conexiones fueron aseguradas mediante abrazaderas metálicas para evitar fugas y garantizar un suministro continuo de aire hacia la cámara, contribuyendo al correcto funcionamiento del quemador.

Figura 16.

Tubería de salida de aire



4.5.2.3. Estructura de soporte de la cámara de combustión. Con el fin de proporcionar estabilidad y soporte a la cámara de combustión, se diseñó y fabricó una estructura metálica de base cuadrada capaz de sostener el sistema durante la operación del quemador. Su diseño considero criterios de resistencia mecánica, estabilidad y capacidad de soportar el peso del conjunto.

La estructura fue construida utilizando perfil angular de acero inoxidable 304 de 3/4 x 1/8 de pulgada. Este material fue seleccionado por su resistencia a la corrosión, buena resistencia mecánica y adecuado comportamiento frente a ambientes expuestos al calor y a los residuos generados durante la combustión. Además, presenta buena soldabilidad y rigidez estructural, características que favorecen a la fabricación y ensamblaje de la estructura.

Geométricamente, la base presenta una configuración cuadrada de 340mmx340mm t una altura de 600mm. Estas dimensiones proporcionan estabilidad a la cámara y mantiene una separación adecuada respecto a la superficie de apoyo, mejorando las condiciones de operación y manipulación durante las pruebas experimentales.

La fabricación se realizó mediante procesos de corte y soldadura de los perfiles angulares, obteniendo una estructura compacta y resistente. Asimismo, el diseño abierto facilita el acceso a la parte inferior de la cámara y a las conexiones del sistema de suministro de aire, favoreciendo las labores de montaje, inspección y mantenimiento.

Finalmente, la estructura permite mantener la cámara en una posición segura y estable, proporcionando el soporte mecánico necesario para el correcto funcionamiento del quemador.

Figura 17.

Estructura de soporte



4.5.3. Ensamble de prototipo

Una vez fabricados los componentes del quemador, se realizó el ensamblaje del prototipo integrando la cámara de combustión, la estructura de soporte, el suministro de aire, la tubería de alimentación de combustible y el turbocompresor. Durante esta etapa se verificó el correcto acoplamiento entre los diferentes elementos, garantizando la estabilidad estructural y la adecuada disposición de las conexiones de aire combustible.

El montaje permitió comprobar que las dimensiones definidas durante la etapa de diseño y modelado en SolidWorks eran compatibles con la fabricación del prototipo, facilitando el ensamblaje de los componentes sin presentar interferencias. Asimismo, se verificó la correcta fijación de las uniones y accesorios, asegurando condiciones apropiadas para el desarrollo de las pruebas experimentales.

Finalmente, el prototipo ensamblado quedó listo para la etapa de evaluación funcional, en la cual se realizaron pruebas de combustión con diferentes combustibles líquidos para analizar su desempeño y comportamiento durante la operación.

Figura 18.

Evaluación de funcionamiento



5. Análisis estequiométrico y de transferencia de calor

5.1. Determinación de la formula empírica del aceite de palma

Comenzando este proceso se tienen en cuenta los ácidos grasos que representan mayores porcentajes en la composición del aceite de palma según el estudio realizado por (Fassinou, 2012b) siendo estos el Ácido Palmítico, Ácido Esteárico, Ácido Oleico y Ácido Linoleico

$$\text{Ácido Palmítico } [C_{16}H_{32}O_2] = 43,04\%$$

$$\text{Ácido Esteárico } [C_{18}H_{36}O_2] = 4,31\%$$

$$\text{Ácido Oleico } [C_{18}H_{34}O_2] = 39,47\%$$

$$\text{Ácido Linoleico } [C_{18}H_{32}O_2] = 10,82\%$$

(OpenStax, s. f.)Explica el procedimiento que se debe seguir para la determinación de fórmulas empíricas y moleculares desde la composición porcentual de una sustancia en este caso el aceite de palma.

Como primer paso será necesario determinar que el porcentaje de la masa de cada elemento en cada uno de los Ácidos que componen el aceite. Como primero se realizará el procedimiento con el Ácido Palmítico, conociendo gracias a la investigación de Fassinou, (2012) que su fórmula molecular es la siguiente. $C_{16}H_{32}O_2$ y que su Masa molar es $M_{\text{Ácido Palmítico}} = 256,43 \text{ kg/kmol}$ y Tomando los valores de masa molar de cada uno de los elementos del libro “Termodinámica” de la autoría de (Cengel & Boles, 2012). Obteniendo los siguientes valores.

$$MC = 12,01 \text{ kg/kmol}$$

$$MH = 1 \text{ kg/kmol}$$

$$MO = 16 \text{ kg/kmol}$$

Ya con todos estos datos definidos podemos comenzar con el procedimiento.

$$\%C = \frac{NC * MC}{M_{\text{Ácido Palmítico}}} * 100 \quad (18)$$

$$\%C = 74,94\%$$

$$\%H = 12,48\%$$

$$\%O = 12,48\%$$

Repitiendo Este procedimiento con cada acido obtenemos los siguientes valores.

- Ácido Esteárico [$C_{18}H_{36}O_2$]:

$$M_{\text{Ácido Esteárico}} = 284,48 \text{ kg/kmol}$$

$$\%C = 75,99\%$$

$$\%H = 12,65\%$$

$$\%O = 11,25\%$$

- Ácido Oleico [$C_{18}H_{34}O_2$]

$$M_{\text{Ácido Oleico}} = 282,47 \text{ kg/kmol}$$

$$\%C = 76,53\%$$

$$\%H = 12,04\%$$

$$\%O = 11,33\%$$

- Ácido Linoleico [$C_{18}H_{32}O_2$]

$$M_{\text{Ácido Linoleico}} = 280,45 \text{ kg/kmol}$$

$$\%C = 77,08\%$$

$$\%H = 11,41\%$$

$$\%O = 11,41\%$$

Una vez ya obtenidos estos datos será necesario calcular el porcentaje global de cada uno de los elementos que representará el porcentaje que ocupa el elemento en el aceite de palma. Para esto se realiza la sumatoria de los productos entre el porcentaje que ocupa cada elemento en el ácido graso y el porcentaje que el ácido graso ocupa en el aceite de palma.

$$\begin{aligned} \%C = & (74,94\% * (0,4303)) + (76\% * (0,0431)) + (76,53\% * (0,3947)) \\ & + (77,08\% * (0,1082)) \end{aligned} \quad (19)$$

$$\%C = 74,07\%$$

$$\%H = 11,9\%$$

$$\%O = 11,56\%$$

Una vez obtenidos estos porcentajes globales se normalizan dividiéndolos por la suma de estos porcentajes.

$$\%Total = \%C + \%H + \%O$$

$$\%Total = 97,53\%$$

Ahora se procede a normalizar los porcentajes.

$$\%C = \frac{74,07\%}{0,9753} = 75,94\% \approx 76\%$$

$$\%H = \frac{11,9\%}{0,9753} = 12,2\% \approx 12\%$$

$$\%C = \frac{11,56\%}{0,9753} = 11,85\% \approx 12\%$$

Una vez conocidos el porcentaje que representa cada uno de los elementos dentro del aceite de palma se puede continuar con el procedimiento para determinar su fórmula empírica, para esto se asume una cantidad de aceite de palma, determinando así la cantidad de masa que representará cada elemento en esa carga de aceite, posteriormente se dividirá esta cantidad por su respectiva masa molar, obteniendo de esta manera la cantidad de moles de cada elemento en la fórmula.

Asumiendo 1kg de aceite de palma se obtiene.

$$mC = 0,760kg$$

$$mH = 0,12kg$$

$$mO = 0,12kg$$

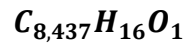
Y se procede a obtener la cantidad de moles de cada elemento.

$$C = \frac{0,760kg}{12,01 kg/kmol} = \frac{0,06328kmol}{0,0075kmol} = 8,437 \quad (20)$$

$$H = \frac{0,12kg}{1 kg/kmol} = \frac{0,120kmol}{0,0075kmol} = 16$$

$$O = \frac{0,12kg}{16 kg/kmol} = \frac{0,0075kmol}{0,0075kmol} = 1$$

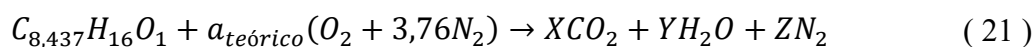
Obteniendo la siguiente fórmula empírica para el aceite de palma:



5.1.1. Cálculos estequiométricos requeridos para la combustión

Una vez ya Determinada la fórmula empírica del aceite de palma es posible realizar los cálculos relacionados con la reacción de combustión, como la cantidad de aire estequiométrico, la relación aire combustible de la reacción, entre otras. Todos estos procedimientos son explicados por (Cengel & Boles, 2012).

Inicialmente se plantea la reacción general de la combustión con aire, considerando que el aire este compuesto por oxígeno y nitrógeno en la siguiente proporción molar $[O_2 + 3,76N_2]$. Dando como resultado la siguiente reacción.



Procediendo a realizar el balance de cada elemento en la reacción

$$C: 8,437 = X$$

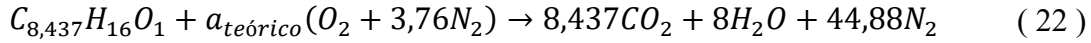
$$H: 16 = 2Y \rightarrow Y = \frac{16}{2} = 8$$

Al momento de realizar el balance del Oxígeno podremos determinar el valor de $a_{teórico}$.

$$O: 1 + 2a_{teórico} = 2X + Y \rightarrow a_{teórico} = \frac{2 * (8,437) + 8 - 1}{2} = 11,937$$

$$N_2: 3,76 * a_{teórico} = Z \rightarrow Z = 3,76 * 11,937 = 44,88$$

Entonces, ya balanceada la reacción de combustión.



Ya con esta reacción balanceada es posible continuar con el procedimiento para determinar la relación aire combustible, primero determinando la masa molar del combustible y la masa que representa $a_{teórico}$.

$$M_{C_{8,437}H_{16}O_1} = 8,437 * (12 \text{ kg/kmol}) + 16 * (1 \text{ kg/kmol}) + 1 * (16 \text{ kg/kmol}) \quad (23)$$

$$M_{C_{8,437}H_{16}O_1} = 133,244 \text{ kg/kmol}$$

Gracias a (Cengel & Boles, 2012) conocemos el valor de la masa molar del aire correspondiente a $M_{aire} = 28,97 \text{ kg/kmol}$. Ahora será necesario determinar el número de moles correspondiente en la reacción para determinar la relación aire-combustible.

$$N_{aire} = a_{teórico} * 4,76 \quad (24)$$

$$N_{aire} = 56,82 \text{ kmol}_{aire}$$

$$m_{aire} = 56,82 \text{ kmol}_{aire} * 28,97 \text{ kg/kmol}$$

$$m_{aire} = 1646,07 \text{ kg}_{aire}$$

$$m_{combustible} = 133,244 \text{ kg}_{combustible}$$

$$AF = \frac{m_{aire}}{m_{combustible}} \quad (25)$$

$$AF = 12,35 \text{ kg}_{aire}/\text{kg}_{combustible}$$

Ya realizados los respectivos cálculos se evidencia que por cada kilogramo de combustible hacen falta 12,35 kilogramos de aire para asegurar una combustión completa.

Una vez determinada esta relación aire-combustible estequiométrica, se procede a considerar condiciones más cercanas a la operación real del sistema, para esto es necesario incorporar los efectos de la humedad contenida en el aire.

Para el análisis, se consideró un 80% de humedad teniendo en cuenta las condiciones climáticas de la ciudad de Bucaramanga.

$$N_{aire} = 56,82 \text{ kmol}_{aire}$$

$$P_{sat@25^{\circ}\text{C}} = 3,169 \text{ kPa}$$

$$P_{total} = 101,6 \text{ kPa}$$

Sabiendo la presión de saturación del agua es posible calcular la presión de vapor del agua en el aire.

$$P_{vapor} = \%Humedad * P_{sat@25^{\circ}\text{C}} \quad (26)$$

$$P_{vapor} = 2,5352 \text{ kPa}$$

Conociendo la presión parcial de vapor de agua se procede a calcular la fracción molar de vapor de agua en el aire húmedo.

$$y_{H_2O} = \frac{P_{vapor}}{P_{total}} \quad (27)$$

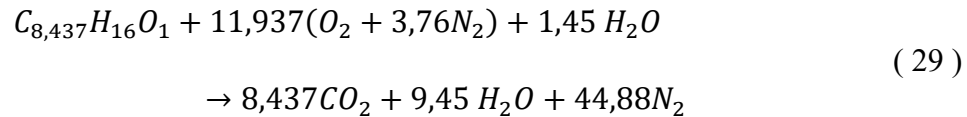
$$y_{H_2O} = 0,025$$

Con la fracción molar ya determinada se procede calculando la cantidad de moles de agua que hay presentes en el aire con la siguiente relación.

$$N_{H_2O} = y_{H_2O} * N_{aire} \quad (28)$$

$$N_{H_2O} = 1,45 \text{ kmol}_{H_2O}$$

Una vez ya se calcularon los moles de H_2O es necesario volver a balancear la ecuación de reacción de combustión la cual resultaría en la siguiente.



5.1.2. Cálculos de llama adiabática

Para determinar la temperatura de llama adiabática o también llamada temperatura de flama adiabática es necesario conocer propiedades de los productos de la combustión como su entalpia de formación y su entalpia en condiciones estándar, estos datos fueron obtenidos en el libro realizado por (Cengel & Boles, 2012).

$$h^{\circ}CO_2@298k = 9\,364\,kJ/kmol$$

$$h^{\circ}H_2O@298k = 9\,904\,kJ/kmol$$

$$h^{\circ}N_2@298k = 8\,669\,kJ/kmol$$

$$h^{\circ}fCO_2 = -393\,520\,kJ/kmol$$

$$h^{\circ}fH_2O = -241\,820\,kJ/kmol$$

Una vez ya balanceada la reacción de combustión teniendo en cuenta la humedad que hay en el aire se puede calcular la temperatura de llama adiabática, pero para encontrar este valor es necesario determinar primero cual es la entalpia de formación del aceite de palma que emplearemos como combustible.

$$\Delta H^{\circ}f_{C_{8,437}H_{16}O_1} = \sum n\Delta H^{\circ}f_{Productos} - \Delta H^{\circ}_{Combustión} \quad (30)$$

También es necesario conocer el poder calorífico del aceite el cual se obtuvo mediante la bomba calorimétrica presente en la sede UIS ubicada en Guatiguara obteniendo el siguiente valor.

$$HHV_{aceite\ usado} = 38,1643\,MJ/kg$$

Con todos los datos necesarios, se realizó el cálculo de la entalpia de formación del combustible, obteniendo el siguiente resultado.

$$\Delta H^{\circ}f_{C_{8,437}H_{16}O_1} = -520163,26\,kJ/kg$$

Ya que se poseen todos los datos necesarios y ya calculada la entalpia de formación del Combustible es posible determinar la temperatura de llama adiabática mediante la siguiente igualdad relación.

$$\sum N_p(\bar{h}_f^\circ + \bar{h} - \bar{h}^\circ) = \sum N_r \bar{h}_{f,r}^\circ \quad (31)$$

Una vez obtenido este resultado se procede a realizar una Iteración para encontrar la temperatura que nos permita cumplir la igualdad, obteniendo como resultado una temperatura de 2423,57 K convirtiendo este valor a grados Celsius seria 2150,42 °C.

$$T_{ad} = 2423,57K$$

5.1.3. *Cálculo de temperatura de productos*

Una vez determinada la composición química del combustible y establecida la reacción estequiométrica de combustión, con el fin de garantizar una combustión completa y estable dentro del quemador se realizará el análisis considerando exceso de aire en el proceso de combustión. La utilización de aire adicional favorece la oxidación total del combustible, previniendo la formación de monóxido de carbono, hollín y residuos no quemados.

Para conocer las capacidades de nuestro sistema de inyección de aire al cual empleando un anemómetro se determinaron la velocidad a la que es capaz de entregar el aire y conociendo el área de salida de este fue posible calcular el flujo entregado.

$$D_{salida} = 0.0254m$$

$$Velocidad_{aire} = 9,8 \text{ m/s}$$

Con estos datos determinados se hizo uso del software “Engineering Equation Solver” (EES) para los cálculos posteriores como el área de salida del sistema y posteriormente el flujo volumétrico del aire.

$$A_{salida} = \frac{\pi}{4} * D_{salida}^2 \quad (32)$$

$$A_{salida} = 5,576 * 10^{-4} m^2$$

Sabiendo que el flujo volumétrico se define como el producto entre la velocidad de salida y el área de salida del aire se obtiene.

$$A_{salida} = \frac{\pi}{4} * D_{salida}^2 \quad (33)$$

$$\dot{V}_{aire} = 5,464 * 10^{-3} m^3/s$$

Conociendo que la densidad del aire es $\rho_{aire} = 1,187 kg/m^3$ es posible calcular el flujo masico del aire.

$$\dot{m}_{aire} = \dot{V}_{aire} * \rho_{aire} \quad (34)$$

$$\dot{m}_{aire} = 6,48 * 10^{-3} kg/s$$

Determinando un tiempo de una hora.

$$\dot{m}_{aire} = 21,22 kg/h$$

Con esta cantidad de aire es posible saber conocer la cantidad en exceso de aire que entrara en la combustión ya conociendo la relación aire-combustible en condiciones estequiométricas.

$$AF_{estequimetrico} = 12,35 \text{ kg}_{\text{aire}}/\text{kg}_{\text{combustible}}$$

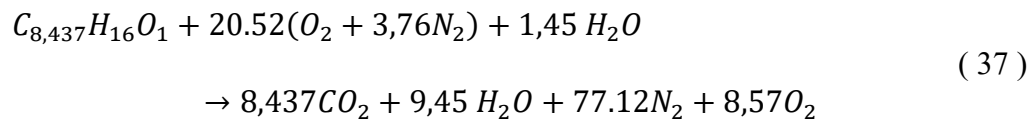
$$m_{exceso} = 21,22\text{kg} - 12,35\text{kg} \quad (35)$$

$$m_{exceso} = 8,87\text{kg}$$

$$\%exceso = \frac{8,87\text{kg}}{12,35\text{kg}} * 100 \quad (36)$$

$$\%exceso = 71,82\%$$

Conociendo este exceso de aire la reacción de la combustión seria la siguiente.



Y con esta reacción de combustión se recalculan la temperatura de llama adiabática y la temperatura de gases de combustión.

$$T_{adiabatica} = 1593,28K = 1320,13^{\circ}C$$

$$T_{productos} = 1428K = 1155^{\circ}C$$

5.1.4. Consumo Teórico de aceite

Para el realizar el cálculo de consumo teórico de aceite es necesario calcular la cantidad de kilo moles de aire que se ingresan a la combustión por kilogramo de combustible

$$\dot{n}_{\text{aire}} = \frac{\dot{m}_{\text{aire}}}{M_{\text{aire}}} \quad (38)$$

$$\dot{n}_{aire} = 2,24 * 10^{-4} \text{ kmol/s}$$

$$\dot{n}_{combustible} = \frac{\dot{n}_{aire}}{N_{aire}} \quad (39)$$

$$\dot{n}_{combustible} = 2,29 * 10^{-6} \text{ kmol}_{combustible}/s$$

Y finalmente convirtiéndolo en unidades de masa por hora se obtiene

$$\dot{m}_{combustible} = \dot{n}_{combustible} * M_{combustible} * 3600 \quad (40)$$

$$\dot{m}_{combustible} = 1,1 \text{ kg}_{combustible}/H$$

5.2. Cálculos de transferencia de calor

5.2.1. Desarrollo experimental y condiciones de operación

Con el propósito de evaluar el comportamiento térmico de la cámara de combustión diseñada para el aprovechamiento energético de aceite, se desarrolló un análisis experimental y teórico de transferencia de calor mediante el Software (Engineering Equation Solver ESS). El análisis permitió determinar las pérdidas térmicas presentes en el sistema, evaluar el desempeño del aislamiento implementado y análisis el comportamiento energético de la cámara bajo diferentes condiciones de operación.

Durante el desarrollo experimental se realizó dos pruebas de combustión bajo diferentes condiciones ambientales. En ambas pruebas se utilizó una mezcla combustible compuesta por 80% de aceite y 15% de gasolina, debido a que el aceite presentó dificultades de ignición cuando era utilizado individualmente.

Asimismo, por cada ensayo se emplearon aproximadamente 400ml de combustible y 1 litro de agua.

La primera prueba fue realizada durante horas del mediodía, bajo condiciones de mayor temperatura ambiente y presencia de corrientes de aire externas, mientras que la segunda prueba fue desarrollada en horas de la noche, donde se presentaron menores temperaturas ambientales y menor influencia del viento.

Tabla 4.

Condiciones experimentales de operación

Parámetro evaluado	Prueba 1 (Mediodía)	Prueba 2 (Nocturna)	Observaciones
Temperatura de llama (°C)	796.5	510	La prueba diurna presentó mayor intensidad de combustión
Temperatura de gases (°C)	312.7	120	Se observó mayor liberación térmica durante el mediodía
Temperatura superficial externa (°C)	65	54	El aislamiento permitió mantener temperaturas externas moderadas

Tiempo de inicio de ebullición (min)	24	12	El agua alcanzó ebullición más rápidamente en la prueba nocturna
Tiempo de evaporación (min)	90	37	La evaporación fue más rápida durante la prueba nocturna
Tiempo total de combustión (min)	110	39	La prueba de mediodía presento mayor estabilidad y duración de combustión

Los resultados experimentales evidencian que las condiciones ambientales influyeron directamente sobre el comportamiento térmico del sistema. Durante la prueba realizada en condiciones de mediodía alcanzaron mayores temperaturas internas y mayores tiempos de combustión, mientras que durante la prueba nocturna el sistema presentó una evaporación más rápida del agua y una disminución considerable del tiempo total de operación.

5.2.1.1. Modelado térmico de la cámara combustión. con base en los resultados experimentales obtenidos, se desarrolló un modelo matemático en EES para analizar los mecanismos de transferencia de calor presentes en la cámara de combustión.

La cámara fue modelada como un cilindro multicapa conformado por acero inoxidable, fibra aislante y mortero refractario. El análisis considero simultáneamente los mecanismos de conducción, convección y radiación debido a las altas temperaturas alcanzadas durante las pruebas.

Tabla 5.

Dimensiones y propiedades térmicas de los materiales empleados

Parámetro	Valor	observaciones
Diámetro externo (m)	0.20	Utilizado para el análisis convectivo externo
Altura del cilindro (m)	0.15	Determinó el área superficial de transferencia
Espesor del acero inoxidable (m)	0.002	Conductividad térmica de 30 W/m*K
Espesor de fibra aislante (m)	0.015	Conductividad térmica de 0.044 W/m*K
Espesor de mortero refractario (m)	0.15	Conductividad térmica de 0.8 W/m*K
Temperatura ambiente (°C)	25	Temperatura ambiente utilizada en el modelo
Emisividad del mortero	0.9	Emisividad utilizada en el modelo

5.2.1.2. Transferencia de calor por conducción. La transferencia de calor por conducción fue analizada mediante la ecuación (2) del marco teórico, correspondiente a conducción radial en cilindros multicapa. Esta ecuación permitió determinar la resistencia térmica generada por cada material implementado en la cámara de combustión.

Tabla 6.

Resistencias térmicas por conducción

Material	Resistencia térmica (K/W)	Observaciones
Acero	0.0007145	Presentó baja resistencia térmica debido a su alta conductividad
Fibra aislante	3.37	Representó la principal barrera de aislamiento térmico
Mortero refractario	0.1626	Redujo las pérdidas energéticas hacia el ambiente

Los resultados muestran que la fibra aislante fue el material con mayor aporte al aislante térmico del sistema, mientras que el acero inoxidable presento menor resistencia debido a su elevada conductividad térmica.

5.2.1.3. Transferencia de calor por convección. Para el análisis convectivo externo fue necesario determinar inicialmente las propiedades termofísicas del aire. Para ello, se utiliza la temperatura de película que se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$T_f = \frac{T_{superficial} - T_{ambiente}}{2} \quad (41)$$

A partir de esta temperatura se obtuvieron propiedades como conductividad térmica, viscosidad cinemática y numero de Prandtl mediante la tabla A-15 del libro transferencia de calor y masa de Cengel.

Tabla 7.

Propiedades termo físicas del aire

Parámetro		Prueba 1	Prueba 2
		(Mediodía)	(Nocturna)
Temperatura		45	39.5
de película (°C)			
Numero	de	0.7241	0.7255
Prandtl			
Viscosidad		1.75×10^{-5}	1.70×10^{-5}
cinemática (m^2/s)			
Conductividad		0.02699	0.02662
térmica del aire			
(W/m*K)			

Posteriormente, mediante la ecuación (5) se determinó el número de Reynolds para identificar el comportamiento del flujo alrededor del cilindro.

Para la convección forzada se utilizó la ecuación (7) correspondiente a la correlación de Churchill y Bernstein. Asimismo, para la convección natural se emplearon la ecuación (8) para el numero de Grashof, la ecuación (9) para el número de Rayleigh y la ecuación (10) correspondiente a la correlación de Churchill y Chu.

Finalmente, debido a que el sistema presento simultáneamente efectos de convección natural y forzada, se utilizó la siguiente ecuación para determinar el Nusselt total.

$$Nu_{total} = Nu_{natural} + Nu_{forzado} \quad (42)$$

Tabla 8.

Resultados de análisis convectivo

Parámetro	Prueba 1 (Mediodía)	Prueba 2 (Nocturna)	Observaciones
Reynolds	38926	40024	Se evidencio flujo externo significativo alrededor del sistema
Numero de Grashof (Gr)	7.08×10^7	5.52×10^7	La prueba diurna presento mayores efectos de flotabilidad térmica
Número de Rayleigh (Ra)	5.12×10^7	4.00×10^7	Se confirmo régimen de convección natural alrededor del cilindro
Nu_forzado	118.8	120.9	Existió transferencia convectiva significativa por acción del flujo externo
Nu_natural	49.19	45.78	La prueba diurna presentó mayor intensidad convectiva
Nu_total	168	166.7	Se observó influencia simultanea de convección natural y forzada

Para la convección interna se utilizó un coeficiente convectivo constante de $75W/m^2 * K$, correspondiente a gases calientes en movimiento dentro de la cámara de combustión.

5.2.1.4. Coeficiente total de transferencia de calor. Una vez obtenido el número de Nusselt total, el coeficiente convectivo externo fue calculado mediante la siguiente ecuación:

$$h = \frac{Nu_{total} * K_{aire}}{D} \quad (43)$$

Donde:

- K_{aire} : conductividad térmica del aire ($W/m \cdot K$)
- D : diámetro externo del cilindro

Tabla 9.

Coeficiente convectivo externo

Parámetro	Prueba 1 (Mediodía)	Prueba 2 (Nocturna)	Observaciones
$h_{conv} (W / m^2 \cdot K)$	17.44	17.07	Valores coherentes para transferencia convectiva en gases

Los valores obtenidos para el coeficiente convectivo se encuentran dentro del rango típico reportado para transferencia de calor en gases mediante convección libre y forzada ($2-25 W / m^2 \cdot K$), según la tabla 1-5 del libro Transferencia de calor y masa de Cengel.

Debido a las elevadas temperaturas alcanzadas durante la combustión, fue necesario incorporar el mecanismo de transferencia de calor por radiación. Para ello se utilizó la siguiente

ecuación para hallar la resistencia de radiación y la ecuación (4) para hallar el coeficiente de radiación.

$$R_{rad} = \frac{1}{h_{rad} * A} \quad (44)$$

Donde:

- h_{rad} : resistencia térmica por radiación ($W/m^2 * K$)
- A : área superficial externa del cilindro (m^2)

Tabla 10.

Transferencia de calor por radiación

Parámetro	Prueba 1 (Mediodía)	Prueba 2 (Nocturna)	Observaciones		
h_{rad} ($W/m^2 * K$)	6.59	6.24	La	radiación	
			incrementó	las	perdidas
			térmicas		
R_{rad} (K/W)	1.239	1.307	Se	obtuvo	menor
			resistencia	frente	a
			temperaturas		altas

Los resultados evidencian que la radiación representa una contribución importante dentro de las perdidas energéticas del sistema debido a las altas temperaturas alcanzadas durante la combustión.

Finalmente, mediante la siguiente ecuación se determinó el coeficiente total de transferencia de calor considerando simultáneamente convección y radiación.

$$h_{total} = h_{conv} + h_{rad} \quad (45)$$

Tabla 11.

Coeficiente total de transferencia

Parámetro	Prueba 1 (Mediodía)	Prueba 2 (Nocturna)	Observaciones
$h_{total} (W / m^2 * K)$	24.03	23.31	La radiación aumento la transferencia térmica total

Los resultados evidenciaron la importancia de incluir el mecanismo radiactivo dentro del análisis debido a las altas temperaturas alcanzadas durante las pruebas experimentales.

5.2.2. Resistencia térmica total

La resistencia térmica total del sistema fue determinada considerando simultáneamente todos los mecanismos de transferencia de calor presentes en la cámara de combustión. El modelo incluyó las resistencias térmicas por conducción a través del acero inoxidable, la fibra aislante y el mortero refractario, además de las resistencias por convección interna, convección externa y radiación térmica.

La resistencia térmica total fue calculada mediante la ecuación (10) del marco teórico.

Debido a que la transferencia de calor desde la superficie externa hacia el ambiente ocurre simultáneamente por convección y radiación, ambas resistencias fueron consideradas en paralelo para obtener resistencia térmica equivalente externa.

Tabla 12.

Resistencia térmica total del sistema

Parámetro	Prueba 1	Prueba 2
	(Mediodía)	(Nocturna)
Paralelo (K/W)	0.266	0.276
R_{total} (K/W)	3.67	3.95

Los resultados obtenidos evidencian que el sistema presento una elevada resistencia total, favoreciendo la conservación de energía dentro de la cámara de combustión. Asimismo, se observó que la fibra aislante represento la principal oposición al flujo de calor debido a su baja conductividad térmica.

La segunda prueba experimental presento un valor ligeramente superior de resistencia total, indicando una menor disipación energética hacia el ambiente. Esto evidencia que el aislamiento implementado mantuvo su comportamiento estable bajo diferentes condiciones ambientales y operativas.

5.2.2.1. Cálculo de calores generados en el sistema. Con el fin de evaluar energéticamente el comportamiento de la cámara de combustión, se realizó el cálculo de los diferentes flujos de calor presentes durante el proceso experimental. El análisis permitió determinar el calor suministrado por el combustible, el calor transportado por los gases de combustión, el calor útil transferido al agua, las pérdidas térmicas del sistema, calor experimental y las eficiencias energéticas.

5.2.2.2. Calor suministrado por el combustible. El calor suministrado por el combustible corresponde a la energía liberada durante el proceso de combustión de la mezcla utilizada experimentalmente. Este parámetro representa la potencia térmica disponible para el proceso de transferencia de calor dentro de la cámara de combustión y fue calculado mediante la ecuación (11) del marco teórico.

Para determinar este valor fue necesario calcular previamente el flujo masico del combustible utilizando la ecuación (12). La densidad del aceite empleada en los cálculos fue obtenida de la tabla A-2 del libro Transferencia de calor y masa de Cengel, considerando un valor de 910 kg/m^3 . Asimismo, se utilizó un poder calorífico inferior (PCI) de 40 MJ/kg , valor reportado para aceites residuales utilizados como combustible.

En ambas pruebas experimentales se emplearon aproximadamente 400 ml de combustible

Tabla 13.

Resultados de calor suministrado por el combustible

Parámetro	Prueba 1	Prueba 2	Observaciones
	(Mediodía)	(Nocturna)	
Volumen del combustible (L)	0.4	0.4	Se utilizó la misma cantidad de combustible
Tiempo de combustión (s)	6600	2340	La primera prueba presento mayor duración
Flujo másico del combustible (kg/s)	0.0000551	0.000146	La segunda prueba presentó mayor consumo instantáneo
PCI (MJ/kg)	40	40	Valor utilizado para aceites
Q_comb (W)	2204	6240	La segunda prueba libero mayor potencia térmica

Los resultados evidencian, que, aunque ambas pruebas utilizaron la misma cantidad de combustible, la reducción del tiempo total de combustión en la segunda prueba produjo un incremento significativo del flujo masico consumido y del calor suministrado. Por el contrario, la primera prueba presentó una liberación energética más estable debido a su mayor duración de combustión.

5.2.2.3. Calor transportado por los gases de combustión. Durante el proceso de combustión, parte de la energía liberada es evacuada mediante los gases calientes generados dentro de la cámara. Este calor representa una fracción importante de las pérdidas energéticas del sistema y fue calculado mediante la ecuación (13) del marco teórico.

Para determinar el calor transportado por los gases fue necesario calcular previamente el flujo masico de aire suministrado al sistema. Este parámetro se obtuvo a partir de la densidad del aire, área transversal de entrada y la velocidad del flujo de aire, empleada durante cada ensayo.

Asimismo, el calor específico de los gases (C_p) fue determinado utilizando la temperatura promedio entre la temperatura de salida de los gases y la temperatura ambiente (25°C). posteriormente, el valor correspondiente fue obtenido de la tabla A-15 del libro transferencia de calor y masa de Cengel.

Tabla 14.

Parámetros utilizados para el cálculo del calor transportado por los gases

Parámetro	Prueba 1 (Mediodía)	Prueba 2 (Nocturna)
C_p (J/kg*K)	1007.3	1007.25
Temperatura promedio ($^{\circ}\text{C}$)	168.9	72.5
Temperatura salida de gases ($^{\circ}\text{C}$)	312.7	120
Temperatura ambiente ($^{\circ}\text{C}$)	25	25

Tabla 15.

Resultados de calor transportado por los gases

Parámetro	Prueba 1 (Mediodía)	Prueba 2 (Nocturna)	Observaciones
Flujo másico de gases (kg/s)	0.00337	0.00347	Los valores obtenidos fueron similares en ambas pruebas
Cp (J/kg*K)	1007.3	1007.25	Determinado a partir de la temperatura promedio de los gases
Temperatura salida de gases (°C)	312.7	120	La primera prueba alcanzo una temperatura de salida considerablemente mayor
Gases (W)	976.62	332.04	La primera prueba evacuo mayor cantidad de energía mediante los gases calientes

Los resultados muestran que durante la primera prueba se transportó una mayor cantidad de energía por medio de los gases de combustión. Esto se debe principalmente a la elevada temperatura de salida registrada, la cual favoreció una mayor transferencia de energía hacia el ambiente.

Por otro lado, durante la segunda prueba la temperatura de salida de los gases fue considerablemente menor, reduciendo el calor evacuado por esta vía. Este comportamiento indica que una mayor proporción de la energía liberada durante la combustión pudo ser aprovechada dentro del sistema antes de abandonar la cámara.

5.2.2.4. Calor útil. El calor útil corresponde a la energía térmica efectivamente transferida al agua durante el proceso de calentamiento y evaporación. Este parámetro fue calculado mediante la ecuación (14) del marco teórico, considerando tanto el calentamiento sensible del agua como el valor latente necesario para su evaporación.

Para ambas pruebas experimentales se empleó 1L de agua, equivalente a 1 kg. Además, se consideró un calor específico del agua de $4180 \frac{J}{kg \cdot K}$ y un calor latente de vaporización de $2257000 \frac{J}{kg}$.

Tabla 16.

Parámetros utilizados para el cálculo de calor útil

Parámetro	Valor
Masa de agua (kg)	1
Temperatura inicial (°C)	25
Temperatura inicial (°C)	100
Calor específico del agua (J/kg*K)	4180
Calor latente de vaporización (J/kg)	2257000

Una vez determinada la energía necesaria para el calentamiento y evaporación del agua, el calor útil fue calculado considerando el tiempo total requerido para completa el proceso de ebullición completa del agua.

Tabla 17.

Resultados de calor útil

Parámetro	Prueba 1	Prueba 2	Observaciones
	(Mediodía)	(Nocturna)	
Masa de agua (kg)	1	1	Se utilizo la misma cantidad de agua
Tiempo de evaporación (s)	5400	2200	La segunda prueba evaporó el agua en menor tiempo
Energía requerida para calentamiento y evaporación (KJ)	2570.5	2570.5	La energía requerida fue la misma en ambas pruebas
Q_{util} (W)	476.02	1168.41	La segunda prueba presentó una mayor transferencia de energía útil

Los resultados evidencian que la energía necesaria para calentar y evaporar completamente el agua fue la misma en ambas pruebas debido a que se utilizó la misma masa de agua. Sin

embargo, el tiempo requerido para completar el proceso fue considerablemente menor durante la segunda prueba.

Como resultado, el calor útil calculado fue superior en la segunda prueba, indicando una transferencia de energía más rápida hacia el recipiente. Este comportamiento evidencia una mayor intensidad de calentamiento durante el proceso de combustión, permitiendo alcanzar la evaporación total del agua en un menor intervalo de tiempo.

5.2.2.5. Pérdidas térmicas. Las pérdidas térmicas representan la energía disipada desde la cámara de combustión hacia el ambiente mediante los mecanismos de conducción, convección y radiación. Este parámetro influye directamente sobre el desempeño energético del sistema, ya que corresponde a la fracción de energía que no es aprovechada durante el proceso.

Las pérdidas térmicas fueron calculadas mediante la ecuación (15) del marco teórico, utilizando la resistencia térmica total obtenida previamente y las temperaturas interna y superficial registradas durante cada ensayo.

Tabla 18.

Parámetros utilizados para el cálculo de perdidas térmicas

Parámetro	Prueba 1	Prueba 2
	(Mediodía)	(Nocturna)
Temperatura de llama (°C)	796.5	510
Temperatura superficial (°C)	65	54
Resistencia térmica total (K/W)	3.945	3.954

Tabla 19.

Resultados de perdidas térmicas

Parámetro	Prueba 1	Prueba 2	Observaciones
	(Mediodía)	(Nocturna)	
Q_perdidas (W)	195.56	122.66	Las perdidas aumentaron con el incremento de la temperatura interna

Los resultados muestran que la primera prueba experimental presento mayores pérdidas térmicas debido a la elevada temperatura alcanzada dentro de la cámara de combustión. Sin embargo, las temperaturas superficiales registradas permanecieron relativamente bajas en ambas pruebas, lo que evidencia la efectividad del aislamiento térmico implementado mediante la fibra aislante y el mortero refractario.

Asimismo, la reducción de la temperatura interna observada en la segunda prueba se produjo una disminución de perdidas térmicas, favoreciendo una mayor conservación de energía dentro del sistema.

5.2.2.6. Cálculo De Calor Experimental. El calor experimental total representa la energía total aprovechada durante el proceso y fue determinado mediante la suma del calor útil transferido al agua, el calor transportado por los gases de combustión y las perdidas térmicas calculadas para cada ensayo.

Este parámetro permite realizar una evaluación global del comportamiento energético del sistema bajo las diferentes condiciones experimentales analizadas.

Tabla 20.

Resultados de calor experimental total

Parámetro	Prueba 1	Prueba 2	Observaciones
	(Mediodía)	(Nocturna)	
Q_{util} (W)	476.02	1168.41	Mayor transferencia útil durante la segunda prueba
Q_{gases} (W)	976.62	332.04	La primera prueba evacuo más energía mediante los gases
$Q_{perdidas}$ (W)	195.56	122.66	Menores pérdidas térmicas en la segunda prueba
Q_{expe} (W)	1648.2	1624.12	Valores globales similares en ambas pruebas

Los resultados muestran que ambas pruebas presentaron valores de calor experimental total muy similares. Sin embargo, la distribución de la energía fue diferente en cada caso. Durante la primera prueba predominó la energía evacuada mediante los gases, mientras que la segunda prueba una mayor fracción de la energía fue transferida directamente al agua.

Este comportamiento demuestra que no solo es importante la cantidad total de energía generada, sino también la forma en que dicha energía es distribuida dentro del sistema.

5.2.3. Eficiencia de combustión

La eficiencia de combustión representa la relación entre la energía aprovechada experimentalmente y la energía suministrada por el combustible. Este parámetro permite evaluar el comportamiento energético del proceso de combustión desarrollado en la cámara y determinar que proporción de la energía suministrada fue aprovechada por el sistema. La eficiencia de combustión fue determinada mediante la ecuación (16) presentada en el marco teórico.

Tabla 21.

Resultados de eficiencia de combustión

Parámetro	Prueba 1 (Mediodía)	Prueba 2 (Nocturna)	Observaciones
$Q_{expe}(W)$	1648.2	1624.12	Energía aprovechada durante cada ensayo
Q_{comb} (W)	2204	6240	Mayor potencia térmica suministrada en la segunda prueba
η_{comb} (%)	74.78	26.02	Mejor desempeño energético durante la primera prueba

Los resultados muestran una diferencia significativa entre las eficiencias de combustión obtenidas en las dos pruebas. La primera prueba presentó una eficiencia de 74.78% mientras que la segunda alcanzó un valor de 26.02%. Esta diferencia se relaciona principalmente con la cantidad

de energía suministrada por el combustible y con la forma en que esta energía fue distribuida durante el proceso de combustión. En la primera prueba, el calor experimental obtenido fue de 1648.20W frente a una potencia suministrada de 2204W, mientras que en la segunda se obtuvo un calor experimental de 1624.12W a partir de una potencia de combustible de 6240W.

Aunque los valores de calor experimental fueron similares entre ambas pruebas, la potencia térmica suministrada durante la segunda prueba fue considerablemente mayor. Esto ocasionó que la relación entre la energía aprovechada y la energía aportada por el combustible disminuyera. En otras palabras, la segunda prueba no presento una menor cantidad de energía aprovechada, sino que requirió una cantidad mucho mayor de energía del combustible para obtener un resultado experimental similar. Esta condición explica la reducción de la eficiencia de combustión hasta el 26.02%. Los resultados globales muestran, además, que el calor experimental total fue de 1648.20W para la primera prueba y 1624.12W para la segunda, valores relativamente cercanos.

La diferencia también puede relacionarse con las condiciones de operación de cada ensayo. La primera prueba fue realizada durante el mediodía, mientras que la segunda se desarrollo durante la noche, bajo condiciones ambientales diferentes. En la primera prueba se registro una temperatura de llama de 796.5 °C, una temperatura de gases de salida de 312.7 °C y un tiempo total de combustión de 110 minutos. En la segunda prueba, estos valores fueron de 510 °C, 120 °C y 39, respectivamente.

La mayor temperatura alcanzada durante la primera prueba estuvo acompañada de una combustión de mayor duración y de una liberación de energía mas prolongada. Sin embargo, esta condición también genero una mayor cantidad de energía evacuada mediante los gases de combustión, alcanzando 976.62W, frente a 332.04W en la segunda prueba. Esto indica que, aunque

la primera prueba presento una mayor eficiencia de combustión, una fracción importante de la energía liberada abandono el sistema en forma de gases calientes.

Por otra parte, las condiciones ambientales y de ubicación de los ensayos también deben considerarse al interpretar estos resultados, debido a que las pruebas se realizaron en condiciones diferentes de horario y exposición al ambiente. Estas variaciones pueden modificar los mecanismos de transferencia de calor por convección y radiación y, por tanto, la diferencia de eficiencia no debe atribuirse exclusivamente al horario, sino al conjunto de condiciones bajo las cuales se desarrolló cada ensayo.

En términos generales, la primera prueba presentó el mejor desempeño desde el punto de vista de la eficiencia de combustión, debido a que logró aprovechar una mayor proporción de la energía suministrada por el combustible. La segunda prueba, aunque permitió una transferencia de calor más rápida hacia el agua, requirió una potencia de combustible considerablemente mayor para alcanzar un calor experimental similar, lo que redujo significativamente su eficiencia de combustión.

5.2.4. Eficiencia Térmica Del Equipo

La eficiencia térmica representa la relación entre el calor útil transferido al agua y la energía suministrada por el combustible. Este parámetro permite evaluar la capacidad del sistema para transformar la energía suministrada en energía térmica efectivamente aprovechada para el calentamiento y evaporación del agua. La eficiencia térmica fue determinada mediante la ecuación (17) del marco teórico.

Tabla 22.

Resultados de eficiencia térmica

Parámetro	Prueba 1	Prueba 2	Observaciones
	(Mediodía)	(Nocturna)	
Q_{util} (W)	476.02	1168.41	Mayor calor útil durante la segunda prueba
Q_{comb} (W)	2204	6240	Mayor energía suministrada durante la segunda prueba
$\eta_{termica}$ (%)	21.6	44.25	La primera prueba presento mejor aprovechamiento global

Los resultados muestran que la segunda prueba presentó una mayor eficiencia térmica, alcanzando un valor de 44.25%, mientras que la primera obtuvo 21.60%. Esta diferencia se explica principalmente por la mayor tasa de transferencia de calor hacia el agua durante la segunda prueba. Aunque en este ensayo se suministró una potencia de combustible considerablemente superior, el calor útil calculado también fue significativamente mayor, alcanzando 1168.41W, frente a 476.02W obtenidos en la primera prueba.

Un aspecto importante para interpretar este resultado es el tiempo requerido para calentar y evaporar el agua. En ambas pruebas se utilizó la misma cantidad de agua, equivalente a 1kg, por lo que la energía total requerida para llevarla desde la temperatura inicial hasta su evaporación fue la misma, con un valor de 2570.5 kJ. Sin embargo, la primera prueba requirió 5400 s, mientras que

la segunda solamente necesito 2200 s. Como consecuencia, la potencia térmica útil calculada para la segunda prueba considerablemente mayor.

Este comportamiento indica que la segunda prueba logró transferir energía al agua a una mayor velocidad. Además, durante este ensayo se registro una temperatura de gases de salida de 120°C, considerablemente inferior a los 312.7 °C registradas durante la primera prueba. En consecuencia, el calor transportado por los gases disminuyo de 976.62 W a 332.04W, lo que indica que una menor cantidad de energía abandonó el sistema a través de los gases calientes.

De manera similar, las perdidas térmicas calculadas fueron menores durante la segunda prueba, con un valor de 122.66W, frente a 195.56W durante la primera. Esta diferencia esta asociada principalmente con las menores temperaturas internas y superficiales registradas durante cada ensayo. La temperatura superficial fue de 65 °C en la primera prueba y de 54 °C en la segunda, lo que evidencia que el aislamiento implementado contribuyó a limitar la transferencia de calor hacia el exterior.

Por lo tanto, aunque la segunda prueba presentó una eficiencia de combustión inferior, presento una mayor eficiencia térmica del equipo. Esto no representa una contradicción, ya que ambos parámetros evalúan aspectos diferentes del funcionamiento. La eficiencia de combustión considera la relación entre el calor experimental y la energía suministrada por el combustible, mientras que la eficiencia térmica se centra específicamente en la cantidad de energía que finalmente fue transferida al agua como el calor útil. En este caso, la segunda prueba consiguió transferir una mayor cantidad de energía útil en un menor tiempo y presento menores perdidas asociadas a los gases y al ambiente, lo que favoreció el incremento de su eficiencia térmica.

Finalmente, las diferencias entre ambas pruebas deben interpretarse considerando que fueron realizadas bajo condiciones ambientales y de operación diferentes, incluyendo el horario y

las condiciones de exposición al ambiente. Por esta razón, los resultados no permiten atribuir el comportamiento de las eficiencias a un único factor. No obstante, los datos obtenidos muestran que, para las condiciones específicas de la segunda prueba, el sistema presentó una mayor capacidad para transferir la energía suministrada hacia el agua, mientras que la primera prueba mostró un mejor aprovechamiento de la energía del combustible desde el punto de vista de la eficiencia de combustión.

6. Discusión y Resultados

6.1. Prueba de funcionalidad del prototipo

Con el fin de evaluar el funcionamiento del quemador, se realizaron pruebas preliminares utilizando diferentes combustibles líquidos. En cada ensayo se analizó la facilidad de ignición, estabilidad de la llama y comportamiento del combustible frente al flujo de aire suministrado por el turbocompresor.

Durante las pruebas se observó que algunos combustibles presentaban dificultades para iniciar y mantener la combustión. Por esta razón, fue necesario implementar procedimientos auxiliares de encendido, como el precalentamiento de la cámara de combustión y el uso de materiales absorbentes impregnados con combustible.

El precalentamiento se realizó para incrementar la temperatura interna del sistema y favorecer la transferencia de calor hacia el combustible. Este procedimiento resalta particularmente importante en aceites y combustibles líquidos residuales, ya que la combustión ocurre principalmente en los vapores generados durante el calentamiento. Según el artículo Combustion, Pyrolysis and Gasification of Waste-Derived Fuel Slurries, Low-Grade Liquids and

High-Moisture Waste, estos combustibles suelen presentar alta viscosidad, baja volatibilidad y mayores retardos de ignición, dificultando la formación de mezclas inflamables estables. En consecuencia, el calentamiento previo favorece la evaporación del combustible y mejora las condiciones para el inicio de la combustión.

Las pruebas realizadas fueron las siguientes:

- Aceite limpio
- Aceite limpio con mecha de algodón
- Aceite de cocina con mecha de algodón
- Aceite de cocina con impurezas y almohadilla de algodón
- Mezcla de aceite de cocina con gasolina

Tabla 23.

Resumen de las pruebas preliminares

Prueba	Combustible	Método auxiliar	Resultado
1	Aceite limpio	Precalentamiento	No se logró la ignición
2	Aceite limpio y algodón	Precalentamiento	La combustión permaneció únicamente sobre el algodón
3	Aceite de cocina usado	Precalentamiento	No se logró la ignición

4	Aceite de cocina usado	Precalentamiento y algodón	Mejor respuesta inicial, pero sin combustión estable
5	Aceite de cocina usado + gasolina	Precalentamiento, algodón y aire	Combustion estable y uniforme

6.1.1. Prueba 1. Aceite limpio

La primera prueba se realizó utilizando aceite limpio como combustible principal. Para favorecer la ignición, se efectuó un precalentamiento de la cámara de combustión durante aproximadamente 5 a 10 minutos. Sin embargo, una vez suministrado el combustible, no se logró iniciar la combustión.

Este comportamiento indico que la temperatura alcanzada no fue suficiente para producir una degeneración continua de vapores inflamables. Debido a la elevada viscosidad y baja volatilidad del aceite, no se formó una mezcla de aire-combustible adecuada para sostener la llama.0

6.1.2. Prueba 2. Aceite limpio con mecha de algodón

Con el propósito de mejorar las condiciones de encendido, se incorporó una mecha de algodón impregnada con aceite. Durante la prueba se observó que la llama se mantenía únicamente sobre el algodón, mientras que el aceite no lograba entrar en combustión de forma autónoma.

Al activar el suministro de aire mediante el turbocompresor, la llama tendió a apagarse. Este comportamiento puede atribuirse al enfriamiento local de la zona de reacción y a la dispersión de los vapores combustibles, afectando la estabilidad de la combustión.

6.1.3. Prueba 3. Aceite de cocina usado

En esta prueba se utilizó aceite de cocina usado aplicando nuevamente el procedimiento de precalentamiento. A pesar del aumento de temperatura en la cámara, no se logró el encendido del combustible.

La presencia de humedad, residuos sólidos y productos de degradación generados durante los procesos de cocción dificultó la formación de vapores inflamables. Como consecuencia, a la energía suministrada no fue suficiente para establecer una combustión estable.

6.1.4. Prueba 4. Aceite de cocina usado con mechera de algodón

Posteriormente se incorporó una mecha de algodón impregnada con aceite usado como método auxiliar de ignición. En comparación con las pruebas anteriores, se observó una respuesta inicial más favorable y una mayor duración de llama sobre el algodón.

No obstante, la combustión continuó concentrándose sobre el material absorbente y no sobre el aceite utilizado como combustible principal. Esto evidenció que la energía generada seguía siendo insuficiente para mantener una vaporización continua del combustible.

6.1.5. Prueba 5. Mezcla de aceite de cocina usado y gasolina

Debido a las dificultades observadas en las pruebas anteriores, se evaluó una mezcla de aceite de cocina usado y gasolina en diferentes proporciones, utilizando nuevamente una mecha de algodón para facilitar la ignición inicial.

Esta configuración permitió obtener una combustión estable y continua. Una vez activado el suministro de aire, se observaron llamas uniformes distribuidas alrededor de la cámara, con una coloración azulada y sin presencia apreciable de humo u hollín. La gasolina favoreció la ignición debido a su mayor volatilidad, mientras que el flujo de aire contribuyó al proceso de gasificación y a la estabilidad de la combustión.

6.1.6. Análisis de las pruebas preliminares

Los resultados obtenidos evidenciaron que tanto el aceite limpio como el aceite de cocina usado presentaron dificultades para iniciar y mantener una combustión estable. Aunque el uso de mechas de algodón mejoró la ignición inicial, la combustión permaneció localizada sobre el material absorbente y no sobre el combustible principal.

La mejor respuesta se obtuvo al incorporar gasolina a la mezcla, ya que este combustible aportó compuestos más volátiles capaces de facilitar la generación de vapores inflamables. Adicionalmente, el suministro de aire favoreció la gasificación y mejoró la estabilidad de la llama. Por esta razón, la mezcla de aceite de cocina usado y gasolina fue seleccionada para las pruebas posteriores de evaluación térmica del quemador.

7. Viabilidad Económica

7.1. Costos de Fabricación

En el desarrollo del quemador requiere además de análisis técnicos, sino también una evaluación económica que permita determinar la viabilidad de su implementación y funcionamiento. Por esta razón, se realizó un presupuesto general del prototipo, considerando los costos asociados a materiales, procesos de fabricación, componentes mecánicos y elementos necesarios para su construcción.

Tabla 24.

Costos de fabricación de sistema de combustión

CANTIDAD	PRODUCTO	VALOR UNITARIO	VALOR TORAL
3	Metro de angulo 3/4*1/8 acero inoxidable 304	\$ 25.000	\$ 75.000
0,6	Metro Tubo HG agua 3/4 "	\$ 55.000	\$ 33.000
1	Codo Calle Galvanizado 3/4"	\$ 9.500	\$ 9.500
1	Niple HG 3/4 x 5cm	\$ 6.000	\$ 6.000
1	Buje galvanizado 1 x 3/4"	\$ 4.900	\$ 4.900
1	Union Galvanizada	\$ 5.200	\$ 5.200
1	Niple HG 1 x 5cm	\$ 6.000	\$ 6.000
1	Metro Conduflex blanca 22mm	\$ 2.000	\$ 2.000
4,1	Metro Tubo Cuadrado 1 1/2" x 1 1/2" C.16 acero inoxidable	\$ 35.122	\$ 144.000
2	Discos de Corte 4 1/2"	\$ 2.000	\$ 4.000
4	Broca 1/16"	\$ 3.500	\$ 14.000
4	Broca 5/64"	\$ 3.500	\$ 14.000

0,5	Kilogramo de Soldadura con electrodo 309L AWS E309L 16 1/8"	\$ 63.000	\$ 31.500
1	Rosca HB - AC 3/8"	\$ 2.500	\$ 2.500
1	Cilindro Acero Inoxidable 20cm Diametro x 15cm	\$ 52.000	\$ 52.000
1	Disco Diametro 20cm Acero Inoxidable	\$ 25.000	\$ 25.000
1	Mano de Obra Soldadura	\$ 120.000	\$ 120.000
TOTAL			\$ 548.600

Si bien en el desarrollo del presente proyecto se realizó el proceso de soldadura en el taller de la escuela de ingeniería mecánica de la universidad industrial de Santander sin costos directos de mano de obra de soldadura se realizó el estudio en diferentes establecimientos especializados con el fin de conocer un monto estimado de costo de esta mano de obra, definiendo este costo en un valor de \$120.000 COP. Esto da como resultado un valor total de costos de fabricación del quemador de \$548.600 COP

7.2. Costos de Operación

Además de los costos asociados a la fabricación del prototipo, resulta necesario evaluar los costos de operación del sistema de combustión, especialmente aquellos relacionados con el consumo de combustible durante su funcionamiento. En esta etapa se realizó una comparación económica entre el uso de GLP y el aceite vegetal usado, considerando el costo de adquisición de cada combustible y la energía suministrada por los mismos. Este análisis permite determinar la viabilidad económica del quemador y estimador del ahorro potencial generado mediante el aprovechamiento energético de aceites residuales como alternativa frente a combustibles.

En el boletín realizado por (Superservicios, 2025) se compila un análisis estadístico de los precios del GLP reportados por distribuidores y comercializadores minoristas durante el primer trimestre del 2025, incluyendo información sobre componentes tarifarios, costos de distribución, transporte y comercialización, así como los valores promedios de cilindros de diferentes capacidades en distintas zonas del país.

Para el desarrollo del presente estudio se tomó especialmente la información correspondiente a la zona oriente, donde incluye el departamento de Santander, permitiendo establecer valores de referencia actualizados para el costo de los cilindros de GLP utilizados en la comparación económica ente el gas propano y el aceite vegetal usado como combustible alternativo.

De acuerdo con la información recolectada durante el estudio, el aceite vegetal usado presenta un costo variable dependiendo de su disponibilidad, método de recolección y proveedor. En algunos casos, este residuo puede obtenerse de manera gratuita mediante procesos de aprovechamiento y recolección en establecimientos comerciales o domésticos, mientras que en otros escenarios su costo puede variar valores aproximados de hasta \$30.000 COP por cada 20 litros de aceite recuperado.

Tabla 25

Comparación de Precios GLP-Aceite Usado

CANTIDAD	PRODUCTO	VALOR	VALOR
		UNITARIO	TORAL
1	Cilindro 30 Lb de Gas	\$	\$
	Propano	84.424	84.424
1	Bidón 20 litros de	\$	\$
	aceite vegetal usado	30.000	30.000

Ya conociendo los costos que tienen cada combustible es posible compararlos para conocer la viabilidad económica del quemador empleando aceite vegetal usado.

En el portal (*LPG as an energy carrier – learn about the calorific value of LPG gas - Imaximum*, s/f) se expone el poder calorífico del gas propano corresponde a un valor de $HHV_{propano} = 46 \text{ MJ/kg}$. Con este dato se procede a realizar una comparación del costo por unidad de energía de cada combustible comenzando por el gas propano.

$$m_{cilindro} = 30\text{Lb} = 13,6\text{kg}$$

$$E_{propano} = HHV_{propano} * m_{cilindro} \quad (46)$$

$$E_{propano} = 625,6 \text{ MJ}$$

$$Costo_{propano} = \frac{84.424}{625,6} = 135 \text{ COP/MJ} \quad (47)$$

Ahora conociendo las propiedades del aceite vegetal usado se realiza el mismo procedimiento

$$Costo_{aceite\ usado} = 42\ COP/MJ$$

Con estos costos es posible calcular el ahorro mensual y el tiempo de recuperación de la inversión del quemador.

$$Costo_{litro\ de\ aceite} = \frac{30.000}{20} = 1.500\ COP/L\ Q = C_{calorifica} * \Delta T \quad (48)$$

Primero se procede a calcular cuánto aceite usado se necesita para suministrar la energía equivalente a un cilindro de 30Lb de gas propano

$$\frac{625,6}{35,98} = 17,39L \quad (49)$$

El costo equivalente del aceite usado seria

$$17,4 * 1.500 = 26.100COP \quad (50)$$

Con este valor se puede calcular el ahorro que supone el uso del aceite usado frente al cilindro de gas propano

$$Ahorro = 84.424 - 26.100 = 58.324COP \quad (51)$$

$$Ahorro = 84.424 - 26.100 = 58.324COP$$

Ahora se procede a calcular el periodo de recuperación de la inversión (PRI) en dos casos particulares, el primero en donde se debe asumir un costo de obtención por el aceite usado y otro en el que se obtiene de manera gratuita.

$$PRI = \frac{\text{Costos de fabricación}}{\text{Ahorro}} \quad (52)$$

$$PRI = \frac{548.600}{58.324} = 9 \text{ meses}$$

$$PRI = \frac{548.600}{84.424} = 6 \text{ meses}$$

8. Conclusiones

Se determinó que el aceite vegetal de cocina usado representa una alternativa más adecuada que el aceite de motor usado para aplicaciones de combustión domésticos. Debido a que presenta menores riesgos asociados a la emisión de compuestos tóxicos y contaminantes durante la combustión, además de presentar mayor facilidad y seguridad de manipulación. Asimismo, su disponibilidad en establecimientos domésticos y comerciales facilita los procesos de recolección y aprovechamiento energético.

El diseño del quemador evidenció la viabilidad técnica de utilizar aceite vegetal usado como combustible, garantizando condiciones adecuadas de combustión, estabilidad de llama y aprovechamiento energético del combustible residual.

El diseño y la selección de materiales implementados en la cámara permitieron desarrollar satisfactoriamente las pruebas experimentales. Los resultados obtenidos evidenciaron que el aislamiento térmico conformado por fibra de vidrio y el mortero refractario logró reducir las

pérdidas de calor hacia el ambiente, manteniendo temperaturas superficiales moderadas durante la operación.

Las pruebas preliminares realizadas permitieron evaluar el comportamiento del sistema frente a diferentes combustibles y condiciones de operación. Se observó que el aceite utilizado individualmente presentaba dificultades de ignición debido a su alta viscosidad y baja volatibilidad. Sin embargo, la incorporación de gasolina favoreció el inicio de la combustión debido a su facilidad de ignición y mayor volatibilidad. Además, el calor liberado durante la combustión permitió mantener caliente la película de aceite dentro de la cámara, favoreciendo la generación continua de vapores inflamables y permitiendo una combustión más estable y sostenida.

El diseño presento ventajas relacionadas con la facilidad de ensamblaje, limpieza y mantenimiento, permitiendo el reemplazo de componentes sin necesidad de reconstruir completamente el sistema.

9. Recomendaciones

Se recomienda implementar una etapa de pulverización y precalentamiento del combustible en futuras mejoras del quemador, ya que estos procesos permitirían reducir la viscosidad del aceite vegetal usado y mejorar su atomización dentro de la cámara de combustión. Esto favorecería una mezcla más homogénea entre el combustible y el aire, generando mayor facilidad de ignición.

Se recomienda realizar futuras pruebas experimentales utilizando diferentes cantidades de combustible y evaluando el sistema bajo distintas condiciones ambientales y horarios de operación, con el fin de analizar con mayor precisión el comportamiento térmico y energético del quemador.

Asimismo, se sugiere evaluar el desempeño del sistema en aplicaciones diferentes al calentamiento de agua, como procesos de cocción o calentamiento de otros fluidos.

Adicionalmente, se recomienda implementar otros materiales aislantes con menor conductividad térmica, con el propósito de disminuir aún más la temperatura superficial externa de la cámara y reducir las pérdidas de calor hacia el ambiente, mejorando así la eficiencia térmica del sistema.

Referencias Bibliográficas

3.2 *Determinación de fórmulas empíricas y moleculares - Química 2ed | OpenStax.* (s/f).

Recuperado el 2 de abril de 2026, de <https://openstax.org/books/qu%C3%ADmica-2ed/pages/3-2-determinacion-de-formulas-empiricas-y-moleculares>

Abedigamba, O. P., Mndeme, F. S., Mawire, A., & Bahadur, I. (2023). Thermo-physical properties and thermal energy storage performance of two vegetable oils. *Journal of Energy Storage*, 61, 106774. <https://doi.org/10.1016/J.EST.2023.106774>

AN INTRODUCTION TO COMBUSTION. (s/f).

Atica | *Gestión de Residuos | Aguas | Valorización.* (s/f). Recuperado el 7 de marzo de 2026, de <https://www.atica.co/Ofrecemos/Valorizacion-Residuos/Gestion-Aceite-Usado>

Calorímetro Isoperibólico 6200 - Parr Instrument (Español). (s/f). Recuperado el 10 de abril de 2026, de <https://www.parrinst.com/es/products/oxygen-bomb-calorimeters/6200-isoperibol-calorimeter/>

Carvajal Escudero, J. J. (2026). Análisis Integral de la Pirólisis para la Valorización de Llantas Usadas: de Residuos a Productos de Alto Valor. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 9(6), 8917–8939. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i6.21998

CASA DE LA CALIDAD (QFD), O MATRIZ DE CALIDAD. (s/f). Recuperado el 26 de mayo de 2026, de <https://www.datadec.es/blog/casa-de-la-calidad-qfd-o-matriz-de-calidad>

¿Cómo debe manipularse el aceite de motor usado? - Agro-Costa S.A.S - Repuesto de Maquinaria Pesada. (s/f). Recuperado el 8 de marzo de 2026, de <https://agro-costa.com/como-debe-manipularse-el-aceite-de-motor-usado/>

Efig. (s/f-a). *AP-42, Vol. I, CH1.11: Waste Oil Combustion*.

Efig. (s/f-b). *AP-42, Vol. I, CH1.11: Waste Oil Combustion*.

Fassinou, W. F. (2012a). Higher heating value (HHV) of vegetable oils, fats and biodiesels evaluation based on their pure fatty acids' HHV. *Energy*, 45(1), 798–805.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.07.011>

Fassinou, W. F. (2012b). Higher heating value (HHV) of vegetable oils, fats and biodiesels evaluation based on their pure fatty acids' HHV. *Energy*, 45(1), 798–805.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.07.011>

Gómez, J., Neumann, T., Guerrero, F., & Toledo, M. (2022). Experimental investigation on combustion and emission characteristics for heavy fuel and used motor oils blends in a free-flames burner. *Fuel*, 307, 121739.
<https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2021.121739>

Holman, J. P. . (1997). *Transferencia de calor*. Cecsca.

Ibarra, E., & Santos, D. U. (2024). *Pirólisis: la descomposición térmica de residuos*.
<https://elementos.buap.mx/directus/storage/uploads/00000011683.pdf>

INCROPERA - Transferencia de calor. (s/f).

Kipkorir, D., Nturanabo, F., Tewo, R., Rutto, H., & Enweremadu, C. (2021). Properties of waste-distilled engine oil and biodiesel ternary blends. *Heliyon*, 7(8).
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07858>

LPG as an energy carrier – learn about the calorific value of LPG gas - Imaximum. (s/f).

Recuperado el 26 de mayo de 2026, de <https://i-maximum.es/sng-lpg-blog/lpg-as-an-energy-carrier-learn-about-the-calorific-value-of-lpg-gas/96111647085332>

mecha | Definición | Diccionario de la lengua española | RAE - ASALE. (s/f). Recuperado el 8 de mayo de 2026, de <https://dle.rae.es/mecha>

¿Qué es una matriz de Pugh? (s/f). Recuperado el 26 de mayo de 2026, de <https://www.modernanalyst.com/Careers/InterviewQuestions/tabid/128/ID/2159/What-is-a-Pugh-Matrix.aspx>

Superservicios. (2025). *BOLETÍN TARIFARIO GAS LICUADO DE PETRÓLEO CILINDROS Y A GRANEL Primer Trimestre de 2025 SUPERINTENDENCIA DELEGADA PARA ENERGÍA Y GAS COMBUSTIBLE DIRECCIÓN TÉCNICA DE GESTIÓN DE GAS COMBUSTIBLE.*
<https://www.superservicios.gov.co/sites/default/files/inline-files/Boletin-tarifario-de-GLP-I-TRIMESTRE-2025.pdf>

transferencia-de-calor-y-masa-yunus-cengel. (s/f).

Yacuzzi, E. (s/f). *QFD: CONCEPTOS, APLICACIONES Y NUEVOS DESARROLLOS.*

Zhao, N., Li, B., Chen, D., Ahmad, R., Zhu, Y., Li, G., Yu, Z., Li, J., Wang, E., Yun, S., Yoon, H., Yoon, I., Zhou, Y., Dong, R., Wang, H., Cao, J., He, J., & Ju, X. (2020). Direct combustion of waste oil in domestic stove by an internal heat re-circulation atomization technology: Emission and performance analysis. *Waste Management*, 104, 20–32.
<https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2020.01.007>

Apéndices

Apéndice A.

Fotografías de materiales y proceso de fabricación

Apéndice A 1.

Aceites empleados para pruebas



Apéndice A 2.

Ventilador utilizado



Apéndice A 3.

Construcción cámara de combustión

**Figura 19**

Tubería de aire y estructura de soporte



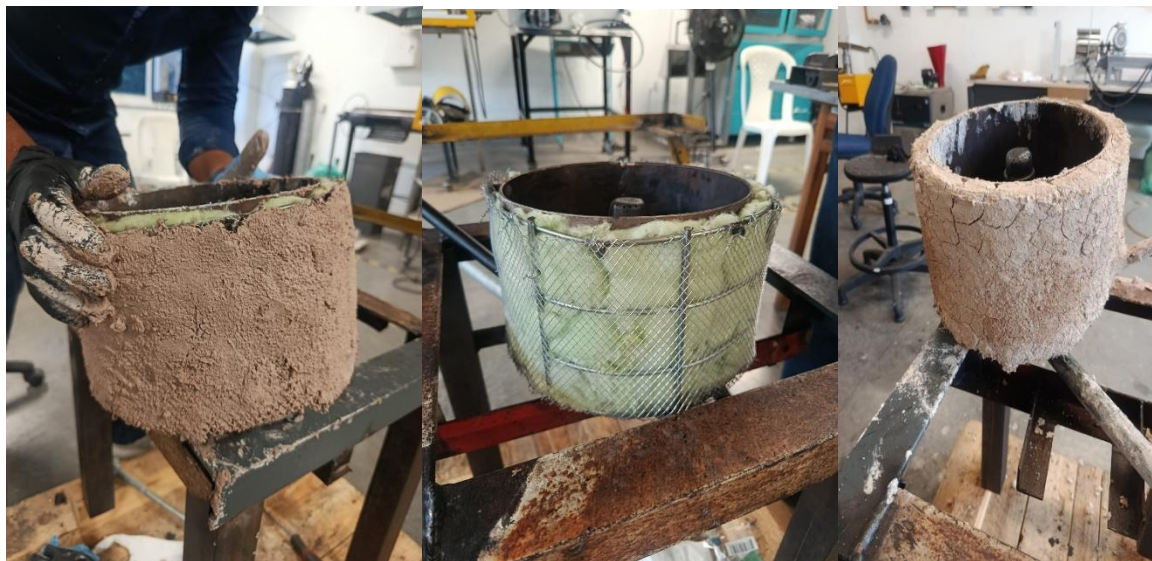
Apéndice A 4.

Pruebas de funcionamiento



Apéndice A 5.

Aislamiento térmico de cámara de combustión



Apéndice B.

Código de cálculo de transferencia de calor

"CALCULOS DE TRANSFERENCIA"

"DATOS DEL ACERO"

$D_{\text{exter}}=0,20$ [m]

$Esp_{\text{acero}}=0,002$ [m]

$Altura_{\text{cilindro}}=0,15$ [m]

"CONDUCTIVIDADES DE MATERIAL"

$K_{\text{acero}}=30$ [w/m* °K]

$K_{\text{fibra}}=0,044$ [w/m* °K]

$K_{\text{mortero}}=0,8$ [w/m* °K]

"ESPESORES"

$Esp_{\text{fibra}}=0,015$ [m]

$Esp_{\text{mortero}}=0,015$ [m]

"DATOS ADICIONALES"

$$\text{Temp_inter}=510 \text{ [}^{\circ}\text{C]}$$

$$\text{Vel_ventilador}=9,8 \text{ [m/s]}$$

$$\text{Vel_aire_Bucaramanga}=2,62 \text{ [m/s]}$$

$$\text{emi_lana}=0,9 \text{ "esta es la emisividad del mortero"}$$

$$\text{Temp_ambiente}= 25 \text{ [}^{\circ}\text{C]}$$

$$\text{h_ambiente_interno}= 75 \text{ [w/m}^2\text{* }^{\circ}\text{K]}$$

$$\text{G}=5,67\text{e-}8 \text{ [w/(m}^2\text{* }^{\circ}\text{K}^4\text{)]}$$

$$\text{Temp_superficie}=54 \text{ [}^{\circ}\text{C]}$$

"Radios"

$$\text{Rad_acero1}=\text{Rad_acero2} - \text{Esp_acero}$$

$$\text{Rad_acero2}=\text{D_exter}/2$$

$$\text{Rad_mortero}=\text{Rad_acero2}+\text{Esp_mortero}+\text{Esp_fibra} \text{ "ester era de lana"}$$

$$\text{Rad_fibra}=\text{Rad_acero2}+\text{Esp_fibra} \text{ "este era de ladrillo"}$$

"AREAS"

$$\text{A_exte}=2*\pi*\text{Rad_mortero}*\text{Altura_cilindro}$$

$$\text{A_inter}=2*\pi*\text{Rad_acero1}*\text{Altura_cilindro}$$

"RESISTENCIAS POR CONDUCCION"

$$\text{Res_acero} = (\ln(\text{Rad_acero2}/\text{Rad_acero1})) / (2 * \pi * K_acero * \text{Altura_cilindro})$$

$$\text{Res_fibra} = (\ln(\text{Rad_fibra}/\text{Rad_acero2})) / (2 * \pi * K_fibra * \text{Altura_cilindro})$$

$$\text{Res_mortero} = (\ln(\text{Rad_mortero}/\text{Rad_fibra})) / (2 * \pi * K_mortero * \text{Altura_cilindro})$$

$$\text{Rcond_total} = \text{Res_mortero} + \text{Res_fibra} + \text{Res_acero}$$

"RESISTENCIAS CONVECCION"

$$\text{Res_con_inter} = 1 / (h_ambiente_interno * A_inter)$$

$$\text{Res_con_exter} = 1 / (h_total * A_exte)$$

"RESITENCIA RADIACION"

$$\text{Res_rad} = 1 / (h_rad * A_exte)$$

$$h_rad = G * \text{emi_lana} * c * b$$

$$c = ((\text{Temp_superficie} + 273)^2 + (\text{Temp_ambiente} + 273)^2)$$

$$b = ((\text{Temp_ambiente} + 273) + (\text{Temp_superficie} + 273))$$

$$\text{R_paralelo} = (\text{Res_rad} * \text{Res_con_exter}) / (\text{Res_rad} + \text{Res_con_exter})$$

$$R_{\text{total}} = R_{\text{paralelo}} + R_{\text{acero}} + R_{\text{fibra}} + R_{\text{mortero}} + R_{\text{con_inter}}$$

$$Q_{\text{perdidas}} = ((T_{\text{inter}} + 273) - (T_{\text{superficie}} + 273)) / (R_{\text{total}})$$

"Iteracion"

$$T_{\text{s_iterada}} = 25[^\circ\text{C}] + Q_2 / (A_{\text{exte}} * h_{\text{total}})$$

$$h_{\text{total}} = h_{\text{conv}} + h_{\text{rad}}$$

$$R_{\text{ext}} = 1 / (h_{\text{total}} * A_{\text{exte}})$$

$$R_2 = R_{\text{ext}} + R_{\text{serie}}$$

$$R_{\text{serie}} = R_{\text{acero}} + R_{\text{fibra}} + R_{\text{mortero}} + R_{\text{con_inter}}$$

$$Q_2 = (T_{\text{inter}} - T_{\text{ambiente}}) / R_2$$

"Propiedades del aire"

$$\nu = 1,702 \times 10^{-5} \text{ [m}^2\text{/s]}$$

$$Pr = 0,7255$$

$$k_a = 0,02662$$

"Conveccion Natural y Forzado"

$$Re = (V_{\text{aire_Bucaramanga}} * (2 * R_{\text{ad_mortero}})) / \nu$$

$$Nu_{cil}=0,3+L*X$$

$$L=((0,62*(Re^{0,5})*(Pr^{0,33}))/((1+(0,4/Pr)^{0,66})^{0,25}))$$

$$X=(1+(Re/282000)^{0,625})^{0,8}$$

"Natural"

$$Tf=((Temp_{superficie}+ Temp_{ambiente})/2)$$

$$\beta=1/(Tf+273)$$

$$Gr_l=(9,81*\beta*Z*j)/r$$

$$Z=(Temp_{superficie}+273)-(Temp_{ambiente}+273)$$

$$j=(2*Rad_{mortero})^3$$

$$r=(v)^2$$

$$Ra_l=Gr_l*Pr$$

$$Nu_{natu}=(0,825+A)^2$$

$$F=(0,387*(Ra_l^{0,166}))$$

$$A=F/P$$

$$P=(1+O)^{0,2963}$$

$$O=(0,492/Pr)^{0,5625}$$

"Nu_total"

$$Nu_total = Nu_natu + Nu_cil$$

$$h_{conv} = ((k_a) / (2 * Rad_mortero)) * Nu_total$$

"EFICIENCIA Y % DE PERDIDAS"

$$Q_total = m_ace * PCI$$

$$m_ace = 0,000525 \text{ [kg/s]}$$

$$PCI = 4e7 \text{ [J/Kg]}$$

$$efi = (1 - (Q2 / Q_total)) * 100 \text{ [%]}$$

$$PORCENTAJE_perdida = (Q2 / Q_total) * 100 \text{ [%]}_$$

$$Ts_interna = Temp_inter - Q_perdidas * Res_con_inter$$

$$Ts_2 = (Q_perdidas * (R_{cond_total} + R_paralelo)) + Temp_ambiente$$

Apéndice C.

Código de cálculos de Combustión

"CALCULOS PARA COMBUSTION Y ESTEQUIOMETRIA"

"C_8,437 H_16 O_1"

$C=8,437$

$H=16$

$O=1$

$N_2=3,76$

$X=C$

$Y=H/2$

$a_{\text{teorico}}=(2*X+Y-O)/(2)$

$Z=N_2*a_{\text{teorico}}$

$T_{\text{estandar}}=25$

$P_{\text{atm}}=101,6$

"Tuberia de 2'' SCH 40"

$$Vel_ventilador=9,8$$

$$D_ext.pulg=1,315$$

$$e=0,133$$

$$D_int.pulg=D_ext.pulg-(2*e)$$

$$D_int.m=D_int.pulg* 0,0254$$

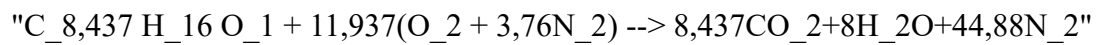
$$A_tuberia=\pi/4*D_int.m^2$$

$$Q_aire=A_tuberia*Vel_ventilador$$

$$\rho_aire=Density(Air_ha;T=T_estandar;P=P_atm)$$

$$m_dot=Q_aire*\rho_aire$$

$$n_dot.aire=m_dot/M_aire$$



$$M_C=12$$

$$M_H=1$$

$$M_O=16$$

$$M_{\text{aire}}=28,97$$

"MASA MOLAR DEL ACEITE"

$$kg_{\text{aceite}}=1$$

$$M_{\text{aceite}}=C*M_C+H*M_H+O*M_O$$

$$masa_{\text{aceite}}=M_{\text{aceite}}*kg_{\text{aceite}}$$

"RELACIÓN AIRE-COMBUSTIBLE"

$$N_{\text{aire}}=a_{\text{teorico}}*4,76$$

$$masa_{\text{aire}}=N_{\text{aire}}*M_{\text{aire}}$$

$$AF=masa_{\text{aire}}/masa_{\text{aceite}}$$

"ASUMIMOS UN 80% DE HUMEDAD RELATIVA EN EL AIRE"

$$T1=25$$

$$x1=1$$

$$P_{total}=101,6$$

$$P_{sat}=Pressure(Water;T=T1;x=x1)$$

$$P_v=P_{sat}*0,8$$

$$N_{Vapor.aire}=(P_v/P_{total})*(N_{aire}+N_{Vapor.aire})$$

$$Y_{total}=Y+N_{Vapor.aire}$$

$$\begin{aligned} & "C_{8,437} \quad H_{16} \quad O_1 \quad + \quad 11,937(O_2 \quad + \quad 3,76N_2) \quad + \quad 1,45 \quad H_{2O} \quad --> \\ & 8,437CO_2+9,45H_2O+44,88N_2" \end{aligned}$$

"OBTENCIÓN DE LA ENTALPIA DE FORMACIÓN DEL ACEITE"

$$HHV_{aceite.nuevo}=-39,6128$$

$$HHV_{aceite.usado}=-38,1643$$

$$h^{\circ}f_{CO_2} = -393520$$

$$h^{\circ}f_{H_2O} = -241820$$

$$SIGMA_{H^{\circ}f_{productos}} = X \cdot h^{\circ}f_{CO_2} + Y_{total} \cdot h^{\circ}f_{H_2O}$$

$$DELTAH^{\circ}_{combustion.nuevo} = HHV_{aceite.nuevo} \cdot M_{aceite} \cdot 1000$$

$$DELTAH^{\circ}_{combustion.usado} = HHV_{aceite.usado} \cdot M_{aceite} \cdot 1000$$

$$DELTAH^{\circ}f_{aceite.nuevo} = SIGMA_{H^{\circ}f_{productos}} - DELTAH^{\circ}_{combustion.nuevo}$$

$$DELTAH^{\circ}f_{aceite.usado} = SIGMA_{H^{\circ}f_{productos}} - DELTAH^{\circ}_{combustion.usado}$$

"CALCULOS PARA LLAMA ADIABATICA"

$$8,437h_{CO} + 9,45h_{H_2O} + 44,88h_{N_2}$$

$$n_{airexcombustible} = a_{teorico} \cdot 4,76$$

$$n_{\text{dot.combustible}} = n_{\text{dot.aire}} / n_{\text{airexcombustible}}$$

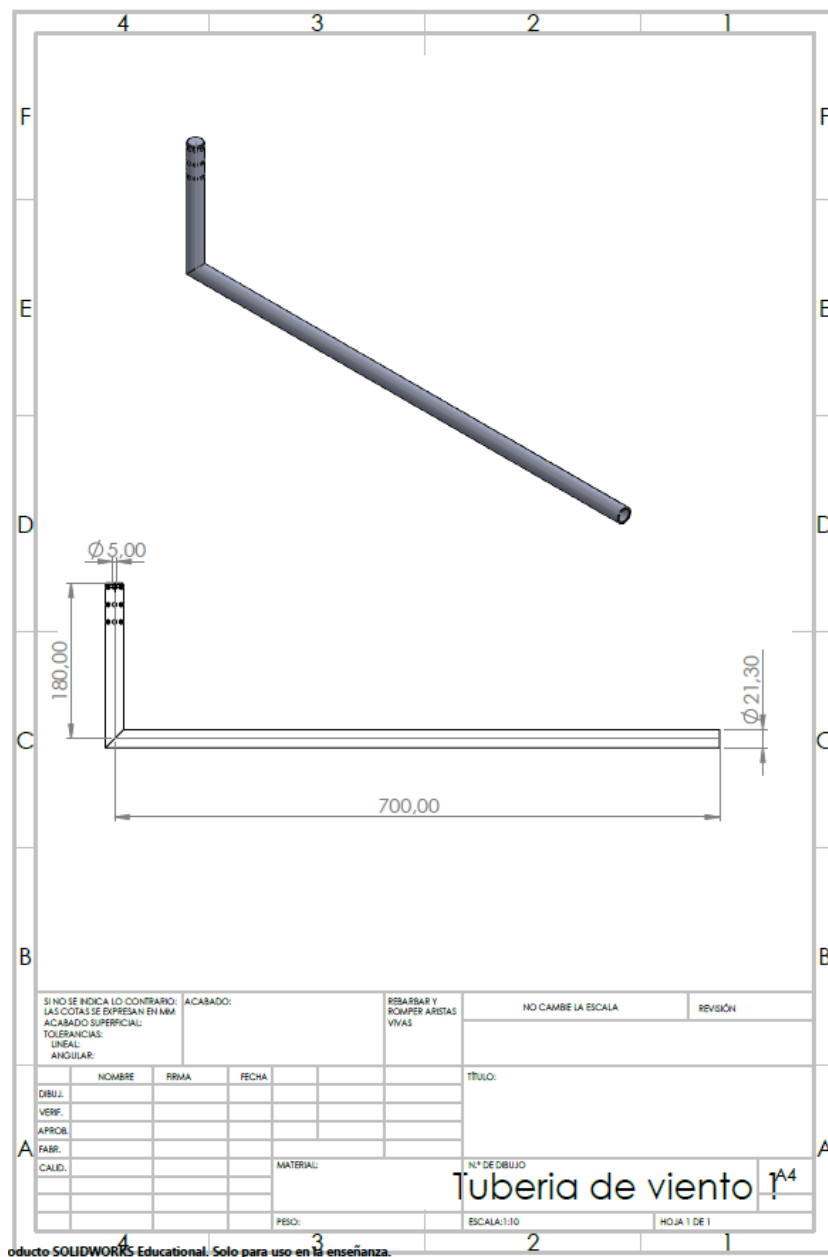
$$m_{\text{dot.aceite}} = n_{\text{dot.combustible}} * M_{\text{aceite}} * 3600$$

$$\text{Carga}_{\text{aceite}} = 0,5$$

$$\text{masa}_{\text{aire.carga}} = AF * \text{Carga}_{\text{aceite}}$$

$$\text{Tiempo}_{\text{consumo}} = (\text{masa}_{\text{aire.carga}} / m_{\text{dot}}) / 60$$

Planos de tubería de Aire



Apéndice D 3.

Planos de estructura de soporte

