



Desarrollo experimental del análisis
termodinámico de los procesos y parámetros
asociados al motor de combustión del
laboratorio de experimentos de la UAN Sede
Puerto Colombia

Jesus Alberto Peralta Rojano
Robinson Junior Lopez Rojano

Universidad Antonio Nariño
Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica
Puerto Colombia, Colombia

2021

Desarrollo experimental del análisis termodinámico de los procesos y parámetros asociados al motor de combustión del laboratorio de experimentos de la UAN Sede Puerto Colombia

Jesus Alberto Peralta Rojano
Robinson Junior Lopez Rojano

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:

Ingeniero Mecánico

Director:

PhD. José Daniel Hernández Vásquez

Línea de Investigación:

Energía

Grupo de Investigación:

GI-Fourier

Universidad Antonio Nariño

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Puerto Colombia, Colombia

2021

Dedicado a Dios y nuestras familias que día a día nos apoyaron incansablemente en esta lucha para alcanzar este gran logro que se cumple. En estos tiempos difíciles que vivimos en nuestro planeta por el Covid-19, es normal en sentirnos con temor, que nuestro día a día ha sido alterado, pero ni este gran problema nos ha hecho bajar los brazos para luchar por nuestros sueños.

Los autores.

Agradecimientos

Le agradezco a Dios por haberme acompañado a lo largo de mi carrera, por ser mi fortaleza en los momentos de debilidad y por brindarme la oportunidad de aprender y de tener una gran experiencia. Agradezco a mi tutor el Ingeniero José Daniel Hernández quien con sus conocimientos y apoyo nos guio a través de cada una de las etapas de este proyecto para alcanzar los resultados que buscábamos. También quiero agradecer a la Universidad Antonio Nariño por brindarme todos los recursos

Resumen

Actualmente, el Laboratorio de Experimentos de la Universidad Antonio Nariño (Sede Puerto Colombia) cuenta con un motor de combustión interna el cual no se encuentra operativo y con necesidad de un mantenimiento, así como su puesta en marcha para actividades académicas, científicas e investigativa. Esto impacta directamente en los resultados de experimentos académicos realizados por el estudiantado que. Esto genera una falencia al futuro ingeniero de la Universidad Antonio Nariño, una vez que un Laboratorio está íntimamente relacionado a la reproducción de experiencia de ingeniería que el futuro egresado enfrentará en la industria. En este sentido, conocer el funcionamiento y características de un motor de combustión interna, se torna un factor relevante en la formación del estudiante. Además, su utilización se constituye en una recuperación de un activo fijo de la institución. En este orden de ideas, este trabajo de grado propone recuperar y poner en marcha este motor, evaluando los procesos termodinámicos asociados, implementando un sistema gravimétrico para la medición del consumo específico de combustible, entre otras actividades.

Palabras clave: Ciclo otto, Eficiencia térmica, Motor de combustión interna.

Abstract

Currently, the Laboratory of Experiments of the Antonio Nariño University (Puerto Colombia Headquarters) has an internal combustion engine which is not operational and in need of maintenance, as well as its start-up for academic, scientific and research activities. This directly impacts the results of academic experiments carried out by students who. This generates a failure for the future engineer of the Antonio Nariño University, since a Laboratory is closely related to the reproduction of engineering experience that the future graduate will face in the industry. In this sense, knowing the operation and characteristics of an internal combustion engine becomes a relevant factor in the student's training. In addition, its use constitutes a recovery of a fixed asset of the institution. In this order of ideas, this degree project proposes to recover and start this engine, evaluating the associated thermodynamic processes, implementing a gravimetric system for the measurement of specific fuel consumption, among other activities.

Keywords: Otto cycle, Thermal efficiency, Internal combustion engine.

Contenido

1. Introducción	14
1.1 Formulación del problema	15
1.2 Objetivos	15
1.2.1 Objetivo general	15
1.2.2 Objetivos específicos	15
1.3 Justificación	16
1.4 Estructura del TIG	16
2. Fundamentos del motor de combustión	17
2.1 Estado del arte	17
2.2 Historia del motor de combustion interna.	21
2.3 Ciclo otto	23
2.4 Rendimiento térmico del Ciclo Otto	24
2.5 Partes del motor	27
2.6 Bloque del motor	28
2.7 Cilindros	28
2.8 Pistones	29
2.9 Anillos	29
2.10 Bulones	30
2.11 Bielas	30
2.12 Culata	31
2.13 Carter	31
3. Aparato experimental	33
3.1 Descripción del motor de combustión	33
3.2 Procedimiento experimental	34
3.3 Actividades Previas	36
3.3.1 Tanque para combustible	36
3.3.2 Carburador	37
3.3.3 Organización del cableado	37
3.3.4 Mantenimiento del motor de combustión	38
3.3.5 Montaje de bascula	38
3.4 Parametros asociados al motor de combustión	39
3.4.1 Sistema de medición de combustible	39
3.4.2 Sistema de medición de temperatura	40
4. Resultados y discusión	41
4.1 Medición experimental de parámetros	41
4.1.1 Consumo de combustible	42

4.1.2	Calor de entrada (Q_{in}), calor de salida (Q_{out}) y trabajo	44
4.1.3	Eficiencia térmica y ecuación de rendimiento térmico.....	46
4.2	Construcción de la guía de laboratorio	47
5.	Conclusiones y recomendaciones	52
	Bibliografía	53
	Anexo A: fundamentos de incertidumbre y calibración de los sensores de temperatura	54

Lista de figuras

Figura 1	– Primer motor de combustión interna y diagrama del ciclo Otto.....	22
Figura 2	– Tiempos de un ciclo Otto – Instituto mexicano del transporte [18]	24
Figura 3	– Ciclo Otto teorico – Instituto mexicano del transporte [18].....	26
Figura 4	– Ciclo Otto real – Instituto mexicano del transporte [17].....	27
Figura 5	– Bloque de motor – Documento motores de combustión interna [16].....	28
Figura 6	– Pistones – Documento motores de combustión interna [16].....	29
Figura 7	– Anillos – Documento motores de combustión interna [16]	30
Figura 8	– Bulón – documento Motores de combustión interna [16].	30
Figura 9	– Biela de un motor – Documento motores de combustión interna [16]	31
Figura 10	– Cartes de un motor – Documento motores de combustión interna [16].	32
Figura 11	- Motor de Combustión Interna de la UAN - Sede Puerto Colombia.....	33
Figura 12	– Partes del Motor de Combustión Interna	34
Figura 13	– Panel de Control del Motor de Combustión Interna	34
Figura 14	– modificación de tanque de combustible en acero inoxidable.....	36
Figura 15	– Sistemas de filtrado de combustible	37
Figura 16	– Mantenimiento a carburador del Generador YAMAHA	37
Figura 17	– Organización de cableado a tablero eléctrico y sensores instalados al motor.	38
Figura 18	– Mantenimiento a motor YAMAHA	38
Figura 19	– Instalacion de balcula TRÚMAX	39
Figura 20	– Sistema de medición de combustible Tanque de almacenamiento – Balcula TRÚMAX.....	39
Figura 21	- Ubicación de sensores en motor de combustión interna	40
Figura 22	– Consumo específico de combustible	43
Figura 23	– Consumo volumétrico de combustible	43
Figura 24	– Calor de entrada al proceso (Q_{in}) y calor perdido en el proceso (Q_{out})	45

Figura 25 – Trabajo realizado..... 45
Figura 26 – Eficiencia térmica y ecuación de rendimiento..... 46

Lista de tablas

Tabla 1 Clasificación de los motores de combustión interna. 22
Tabla 2 – Características técnicas del motor-generator Yamaha 33
Tabla 3 – Datos experimentales 41
Tabla 4 – Consumo específico y volumétrico de combustible 42
Tabla 5 – Calor de entrada (Q_{in}), calor de salida (Q_{out}) 44

1. Introducción

Teniendo en cuenta el origen y la evolución de los motores de combustión interna en el tiempo, nos damos cuenta que en su inicio cada elemento que lo compone es imprescindible para su funcionamiento [1].

Este también es una máquina que se categoriza completa y esto la lleva a hacer funcional, ya que es una máquina productora de energía mecánica. Antes del siglo XIX tenemos algunos ejemplos de motores que a la llegada del petróleo en la producción comercial se realizaron mejoras las cuales fueron importantes, con el fin de que en el siglo hubo diferentes tipos de motores que estaban siendo utilizados en diferentes aplicaciones [2].

Los motores de combustión interna a pesar de ser muy importantes en el sector de la industria, transporte, etc. Presenta problemas con la alta contaminación de CO₂, en el aire y sin dejar atrás la gran dependencia del petróleo que no es una materia prima infinita que con el pasar de los años esta se va a agotar. Estas máquinas aun teniendo estas desventajas son indispensables y las cuales son fabricadas en diferentes modelos y gamas dependiendo el uso que se le va a dar teniendo en cuenta la potencia que se requiera [3].

El motor de combustión interna que se encuentra ubicado en el laboratorio de experimentos, fue adquirido en uno de los proyectos de investigación el cual fue realizado en una convocatoria propuesta por la Vicerrectoría de Ciencias, Tecnología e Innovación de la Universidad Antonio Nariño. Este proyecto fue realizado por Duarte en el momento se constituyó como un avance a la investigación de la universidad por la implementación y conceptualización que se le dio al sistema, el cual generó diferentes productos científicos en revistas [4], [5].

1.1 Formulación del problema

Actualmente el Laboratorio de Experimentos de la Universidad Antonio Nariño (Sede Puerto Colombia) cuenta con un motor de combustión interna. Este motor actualmente se encuentra inoperativo por la ausencia de mantenimiento preventivo, así como fallas en su sistema de medición de temperatura, sistema de combustión y sistema de refrigeración.

En este orden de ideas, una vez descrita la problemática presentada, se espera que el desarrollo del trabajo de grado, así como los resultados consolidados que deriven del mismo, contribuyan al fortalecimiento de las mediciones obtenidas en el Laboratorio de Experimentos de la Universidad Antonio Nariño, Sede Puerto Colombia.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Desarrollar experimentalmente un análisis termodinámico de los procesos y parámetros asociados al motor de combustión del laboratorio de experimentos de la UAN Sede Puerto Colombia.

1.2.2 Objetivos específicos

Para atender el objetivo general de la investigación, tres objetivos específicos han sido formulados:

- Identificar en la literatura especializada el estado del arte de bancos de pruebas de motores de combustión interna con el fin de enmarcar el diseño conceptual del proyecto.
- Evaluar los parámetros que caracterizan el desempeño termodinámico del motor de combustión interna (RPM, Consumo específico de combustible y Eficiencia térmica) así como obtener las curvas características de operación.
- Construir las guías de laboratorio que permitan al estudiante desarrollar de forma orientada las distintas prácticas que pueden ser realizadas en el banco de prueba del motor de combustión interna.

- Establecer la ecuación de rendimiento del motor buscando una optimización del mismo para fines académicos e investigativos.

1.3 Justificación

El proyecto surge de la necesidad de desarrollar un equipo de laboratorio que nos permita conocer los principios, fenómenos y partes de un motor de combustión interna el cual nos va a brindar posibilidades de evaluar aspectos que son básicos del motor y soportar los conceptos teóricos dados en clases, teniendo en cuenta lo anterior lo que se busca con este proyecto es la puesta en marcha del motor de combustión interna del laboratorio y con este se puedan evaluar los diferentes parámetros que caracterizan el desempeño termodinámico del motor, la construcción de las Guías de laboratorios las cuales permitirán desarrollar de forma orientada las distintas prácticas que se realizarán en el laboratorio.

Cabe resaltar que con este proyecto vamos a ver involucradas materias dadas en el curso de pregrado de ingeniería mecánica como la parte de termodinámica, diseño mecánico y motores de combustión interna, las cuales nos brindan a nosotros afianzar los conocimientos adquiridos durante el proceso de formación.

1.4 Estructura del TIG

El capítulo 1 de este proyecto comprende todo lo relacionado con la introducción de la historia del motor de combustión interna, la utilidad de los bancos de prueba de motores de combustión interna. Objetivos generales y específicos para llevar a cabo cada uno de los pasos del proyecto, y por último la justificación que nos permite entender la necesidad del proyecto. El capítulo 2, redacta los conceptos fundamentales del motor de combustión interna, la realización del estado del arte referente a bancos de prueba de motores de combustión interna, historia del motor de combustión interna, el ciclo Otto y por último hacemos referencia a las partes del motor de combustión interna. El capítulo 3 presenta la metodología implementada en el curso de los experimentos. Ya el capítulo 4 consolida los principales resultados del proyecto de investigación y, finalmente, el capítulo 5 presenta las conclusiones y recomendaciones para posibles desdoblamientos futuros a la luz de la experiencia aprendida.

2. Fundamentos del motor de combustión

Este segundo capítulo se detallará los conceptos fundamentales relacionados con el proyecto de investigación y la realización de un estado del arte.

2.1 Estado del arte

John R. Agudelo, Pedro Benjumea, Edwin Gómez Meneses y Juan Fernando Pérez Bayer en el año 2002 realizaron una investigación la cual fue relacionada con el desempeño Ambiental y mecánico de los motores Diesel en dicha investigación utilizaron diferentes tipos de combustibles entre ellos alquilésteres los cuales fueron obtenidos de los Aceites vegetales (Biodiesel) y Diesel convencional. Con esto se puede apreciar que dependiendo del tipo aceite con el cual se obtenga el alquilésteres juega un papel importante, podemos decir que la mezcla de Biodiesel-Diesel tiene un porcentaje mayor de Biodiesel esta genera una disminución de la potencia y aumenta aun mas el consumo de combustible, aporta una disminución del CO, Hc, hollín entre otras. Entre un 10%-24% aumenta el consumo de combustible Biodiesel por su poco poder calorífico, la disminución de las emisiones de CO está en 10%-50%. [6]

John Ramiro Agudelo, Carlos A. Sanches y Alejandro Valencia en el año 2003 realizaron una revisión a las modelaciones matemáticas en el proceso de renovación a los motores de combustión interna 4 tiempo, en el que utilizaron una herramienta la cual ayudo a minimizar el trabajo del motor en el desplazamiento de los flujos entrantes y salientes, teniendo presenta que la admisión y el escape son los responsables de la eficiencia. El

flujo de aire juega un papel impórtate en la renovación de la carga y estos se clasifican en un orden el cual depende la complejidad y la presión, en este tema se unas de las técnicas mas usadas son las de diferencias finitas ya que son usadas para resolver sistemas de ecuaciones resultantes, cabe resaltar que lo anterior es utilizado en una herramienta computacional soportada y esto permite que lo ingenieros no tengan que el modelo matemático y la convergencia de los modelos. [7]

A.S. Ramadhas, S. Jayaraj y C. Muraleedharan en el año 2005 realizaron una investigación en la cual querían encontrar que combustibles alternativos serian adecuados a los del petróleo. Quieren ver que tan viable es el uso de los combustibles renovables como el biodiesel, biogás y etanol en los motores diésel, el biodiesel dependerá mucho de del tipo de aceite que se utilice ya que en ello juega las propiedades de cada uno y del proceso de transesterificación que se le aplique. En esta investigación se utilizó como combustible renovable el biodiesel a base de aceite de semilla de caucho. El cual es desarrollado en dos fases en la transferencia de ácido-alcalina en el cual se producen los esteres metílicos del aceite de semilla de caucho. Este biodiesel esta muy relacionado con el combustible diésel por sus propiedades. [8]

Gabriel Fernando García Sánchez, Jorge Luis Chacón Velasco y Arlex Chaves Guerrero, realizaron un artículo el cual presenta un estudio de varios modelos de motores de combustión utilizando como combustible el diésel a nivel internacional y nacional. Este estudio no solo se ha venido trabajando en la actualidad si no que ha sido durante décadas debido a que siempre se a buscado mejorar el rendimiento de los motores y la contaminación que estos traen consigo. Estos estudios tienen una desventaja la cual es que requiere de un gran recurso económico y a su vez tiempo por esto han tomado modelos computacionales los cuales permiten estudiar el proceso de combustión de una manera más practica y económica. [9]

Jorge Duarte, German Amador, Jesús García entre otros en el año 2014 realizaron una investigación relacionada con el autoencendido de motores de combustión interna turboalimentados que funcionan con combustibles gaseosos, el cual presento una estrategia de control el cual se implementaría en el sistema de autoencendido en motores de combustión interna turboalimentados los cuales trabajan con combustible gaseosos. En esta investigación se dio a conocer que la presión ambiental y la temperatura ambiente es

una variable perturbadora también que valido un sistema termodinámico en el cual se predice la temperatura en el punto de ignición el cual nos lo da un gran numero de datos experimentales en los motores turboalimentados, se le mira el rendimiento de una nueva estrategia de control de autoencendido. Se implementa el control feedforward el cual presento el mejor desempeño en las pruebas, pero a pesar de que fue el de mejor desempeño se le debe instalar un sensor y desarrollar una nueva lógica de control. [10]

Diego Fernando Camacho Gómez y José Manuel Riesco Ávila realizaron un trabajo en el año 2015 relacionado a un banco de prueba para motores de combustión interna. En el cual se iba a obtener como resultado mediciones con la cuales de determinarían las condiciones operacionales del motor, tales como el flujo de aire, par del motor, consumo de combustible entre otras variables con estos valores obtenidos se determinarían las curvas de trabajo del motor. Se plantea un diseño en el cual se utilicen elementos electrónicos con la capacidad de medir propiedades físicas del motor, también implementar diferentes mecanismos hidráulicos, neumáticos, eléctricos y mecánicos que sean capaz de mantener una velocidad en el motor las cuales deben dar diferentes revoluciones. Esto dará como resultado una confiabilidad en lo datos obtenido en las mediciones. [11]

Isacc Enrique Magaña Ocaña y José Manuel Riesco Ávila en el año 2015 realizaron una investigación la cual habla sobre la importancia de los bancos de motores de combustión interna los cuales tienen en su operatividad tiene una variabilidad, por esto se han creado diferentes tipos de mecanismos que nos han ayudado a realizar pruebas controladas, en las que nos podemos basar y dar la confiabilidad de que el motor este operando en normatividad, se pueden obtener por medio de los ensayos que se le realizaron a los motores bajo a las condiciones mas cercanas a las ideales una reducción del consumo del combustible, y un buen aprovechamiento de la potencia la cual pueda desarrollar. [12]

Jorge Duarte, Wilman Orozco, Jorge González, Edgardo Buelvas y Lesme Corredor en el año 2016 realizaron un artículo relacionado con el análisis termodinámico en la autoignición en motores de encendido provocado en el cual dice que hay estudios los cuales dan detalle de un fenómeno del Auto-detonación en los combustibles líquidos y el gas natural. De este tema la información y los estudios son muy pocos y los que hay en la actualidad son de la cinética de la combustión, pero no se ha estudiado un tema muy

importante como lo es el autoencendido el cual se da antes del punto de la ignición, esta investigación se baso en hacer un análisis termodinámico el cual es para realizar un estudio al fenómeno de la auto-ignición con los combustibles gaseosos en la etapa de compresión del motor, se tuvieron en cuenta en el análisis varios factores como la composición del combustible y algunos parámetros relevantes. El enfoque de esta investigación se centra en la termodinámica de equilibrio lo cual nos va a permitir estimar una buena práctica de las condiciones y funcionamiento del motor. Los resultados obtenidos nos permiten estudiar la relación de compresión adecuadas para así obtener una eficiencia similar obtenida con el gas natural. [4]

Jorge Duarte, Jesús García, Javier Jiménez, Marco E. Sanjuan, Antoni Bula y Jorge González en el año de 2016 realizaron un artículo relacionado con el control de encendido de motores por medio de chispas mediante la estructura de control interno, en el cual nos dice la viabilidad de poder aplicar una estrategia de control el cual nos va ayudar a mitigar el fenómeno que se presenta en los equipos como lo es el de autoencendido, el cual afecta muy considerablemente el desempeño del motor. El cual aplica un modelo bidimensional de ecuaciones termodinámicas con la cual se simulan las condiciones que opera el motor alimentándolo con gas natural. También se emplean varias estrategias de control con las cuales se podrá evaluar con cual de ellas no padecerá del fenómeno de autoignición. Para ellos logras ese objetivo debieron implementar un sistema de control multivariante para así obtener una manipulación simultanea con la relación combustible/aire. Las estrategias utilizadas muestran que es difícil evitar que se dé el autocendido. [13]

Hugo Narváez, Simón Villareal, Jorge Duarte, Adriana Rincón en el año 2017 realizaron una investigación sobre la implementación de un banco de pruebas para motores Diesel el cual nos da los criterios necesarios para realizar un buen diseño de un banco de prueba en cuanto a su construcción. En este trabajo se tuvo en cuenta puntos importantes como lo es la ergonomía y la seguridad el cual va a garantizar un equipo confiable a la hora de ser utilizado, en esta investigación se tuvieron presente la carga que iban a tener los sistemas y subsistemas las cuales fueron puestas a pruebas en simulaciones se concluyo que dicho banco en su construcción y al momento de operar no presento ninguna avería o anomalía. [14]

German Amador, Jorge Duarte, Jesús García, Adriana Rincón entre otros realizaron un artículo en el año 2017 el cual nos hablaba de la potencia máxima del flujo de fluidos aplicando la primera y segunda ley de la termodinámica el cual se realizó un estudio teniendo condiciones reales ya que se conto con una planta térmica. Al pistón se le hace un análisis de presión, se propone un modelo con el cual se obtuvo la potencia y la velocidad optimas. Finalmente aplicaron un modelo que se propuso y que a su vez condiciones de flujo vez calcular el trabajo disponible el cual es perdido en una turbina la cual debe estar operando en condiciones de flujo constante. [5]

Trujillo Tello, Padilla Padilla, Buenaño Moyano, Cuaical Angulo en el año 2020 realizaron un trabajo de investigación el cual nos brindó una comparativa entre los trabajos ya realizados con respecto a la operación sistemas de combustión, se tuvieron monitoreando el funcionamiento del motor por los diferentes sistemas de control, como lo son la inyección electrónica, sistema de distribución variable, la turbina entre otros elementos. Los sistemas electrónicos con amplios y sin dejar atrás el sistema de control los cuales se compararán con los elementos mecánicos y eso nos lleva a que el motor debe ser calibrado. [15]

2.2 Historia del motor de combustion interna.

El reto mas grande e importante de la ingenieira es la transición de las fuentes de energía, las cuales nos ofrece la prodigiosa madre naturaleza, de la manera mas fácil para ser aprovechada por el hombre.

Entre 1856 y 1862 el ingeniero Beau De Rochas (1815 - 1891) los ingenieros Ecole y Polytechnique, siguiendo esta tradición analítica, estos ingenieros realizan muchas investigaciones, que meses después publicaron en pequeños libros estas investigaciones, basados en los principios termodinámicos de esa época, establecieron clicos teóricos del proceso termodinamico del gas de un recipiente rigido, siendo capaz de sostener el funcionamiento de la maquina de combustión interna cuatro tiempos, esta funcionaba con gas combustible, el ingeniero de Rochas no alcanzo a construir dicha maquina. Esto corresponde al francés Joseph Etienne Lenoir 1822 -1900, fue el inventor del primer motor de combustión interna en 1859, este motor no era muy eficiente escasos 5% de eficiencia, pero tenia incorporado una bujía para poder hacer el encendido de la mezcla, este motor

de combustión interna solo poseía un solo pistón y un solo lado del tiempo, se tenía que realizar otra combustión del lado del mismo, se requería por lo menos dos sistemas de ignición, de tal manera que el ingeniero lenoir consiguió reparar usando un solo alambre que alcanza ambos lados del pistón. Este motor fue movido por gas de carbón mezclado con aire, este motor fue de tipo experimental y se dio la pauta para que otros ingenieros, lleven a profundidad los motores de explosión que a futuro vendrán después. Las posibilidades de uso quedaron resueltas el año siguiente 1860, cuando se dio la construcción del primer coche sin caballos de fuerza que utilizo un motor de combustión y no de vapor, como el que armara en 1857, Joseph Nicolas cougnot, igualmente en Francia. En el año 1867 el ingeniero alemán Nikolaus August otto 1832 – 1891 en ayuda de su auxiliar mecanico E. Langen, estos desarrollaron un motor de combustión interna que sobrepaso ligeramente el motor de Lenoir, aprovechando el movimiento libre del pistón para generar trabajo, pero seguía siendo un motor atmosférico debido a que no incluía compresión anstes de la mezcla, pero otto continuó trabajando, asi fue que en 1876 logro construir un motor de cuatro tiempos de toda la historia.[16]

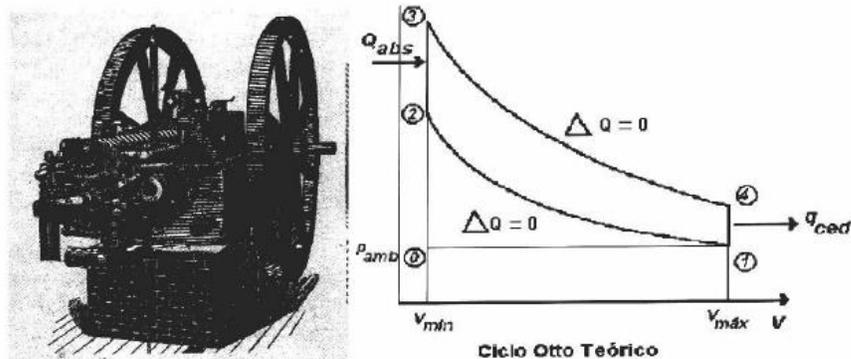


Figura 1 – Primer motor de combustión interna y diagrama del ciclo Otto

Fuente: Revista facultad de ingeniería N° 26 PP. 68 – 78 junio 2002 [17]

Tabla 1 Clasificación de los motores de combustión interna.

Aplicación	En automóviles, camiones, locomotoras, avión ligero, marino, sistema de potencia portátil y generación de energía
Diseño básico del motor	Motores recíprocos (subdivididos por el arreglo de los cilindros: En línea, en V, etc.), motores rotatorios (Wankel y otras geometrías)
Ciclos de funcionamiento	Ciclo de cuatro tiempos: Aspirado naturalmente (admitiendo el aire atmosférico), sobrealimentado (admite previamente comprimida la mezcla fresca) y turbocargado (admitiendo la mezcla fresca comprimida en un compresor conducido por una turbina de extractor), ciclo de dos tiempos: Sobrealimentado y turbocargado
Válvula o diseño del puerto y localización	Válvulas en la cabeza, válvulas debajo de la cabeza, válvulas rotatorias, etc.
Combustible	Gasolina, Diesel, gas natural, gas líquido, alcoholes (metanol, etanol), hidrógeno, combustible dual
Método de preparación de la mezcla	Carburación, inyección del combustible en los puertos, inyección del combustible en el cilindro del motor
Método de encendido	Encendido por chispa, encendido por compresión
Diseño de la cámara de combustión	Cámara abierta, Cámara dividida
Método de control de carga	La estrangulación de la mezcla del flujo del combustible y de aire junto permanece sin cambio, control del flujo del combustible solamente, una combinación de éstos
Método de enfriamiento	Enfriados por agua, enfriados por aire, sin enfriar (por convección y radiación naturales)

Fuente:

Investigación sobre la caracterización de un motor de combustión interna con dos tipos de combustible [18]

2.3 Ciclo otto

Sin excepción alguna los motores tienen su origen en los ciclos termodinámicos, los cuales tratan de una serie de eventos, en los que se recibe la energía en niveles muy elevados, esto se convierte en trabajo la mayor parte, y el restante se esparce al medio de que lo rodea. En 1862 el francés de rocha patentó un ciclo, esta patente fue aprovechada por dos alemanes Otto y Langen motor cuatro tiempos. Primer motor con ciclo otto, ciclo mecánico del motor otto cuatro tiempos, se da con cuatro carreras del pistón, dos vueltas el cigüeñal y el eje de levas una.

El motor cuatro tiempos de encendido a chispa, el cilindro entra durante el proceso de admisión, una mezcla de aire y combustible con una relación determinada, en el proceso de la carrera de admisión el pistón se mueve desde su punto muerto superior (P.M.S) hasta llegar al punto muerto inferior (P.M.I) en cuanto a la válvula de admisión permanecerá abierta. Cuando se termine el proceso de llenado, se comprime la mezcla de aire combustible y por último el pistón desde su P.M.I hasta P.M.S, en la carrera de compresión las válvulas permanecen cerradas, admisión y escape. Al finalizar este proceso

se realiza la combustión mezcla aire – combustible por acción de la bujía, aumentando la presión y su temperatura en la mezcla, en cuanto al volumen permanecerá constante en su valor mínimo debido a la combustión [18].

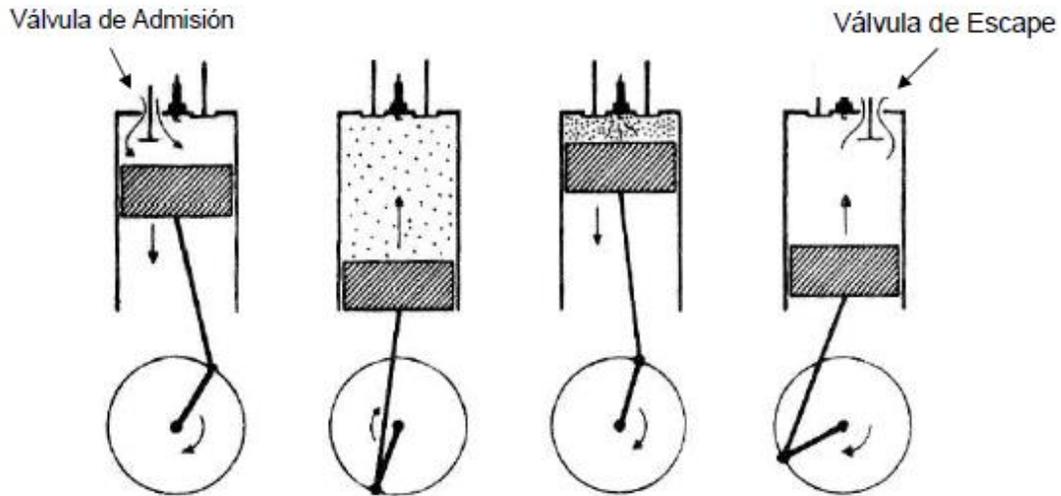


Figura 2 – Tiempos de un ciclo Otto – Instituto mexicano del transporte [18]

2.4 Rendimiento térmico del Ciclo Otto

Los motores de combustión interna, dado su funcionamiento basado en el ciclo Otto, el calor (Q_{in}) entra a volumen constante (proceso 2,3) y así mismo el fluido que opera es supuestamente un gas perfecto, existe la posibilidad de estimar la cantidad de calor mediante la variación de la energía interna, en conformidad con la ecuación (1)

$$Q_{in} = C_v \cdot (T_3 - T_2),$$

1

en la fórmula anterior (Q_{in}) indica el calor agregado en la combustión C_v : indica el calor específico a volumen constante, T_3 : indica temperatura al final del paso a paso de la combustión y por último T_2 : indica la temperatura final de compresión, en conclusión el calor rechazado al exterior (ambiente) (Q_{out}) se puede determinar con el mismo principio, cuando el proceso 4,1 este se realiza de forma isocórica, en la ecuación número dos (2) podemos utilizar expresión para determinar la cantidad de calor rechazado en el proceso 4,1.

$$Q_{out} = C_v \cdot (T_4 - T_1) \quad 2$$

Em la termino anterior, Q_{OUT} indica la cantidad de calor perdido C_v : este indicara el volumen constante T_4 : indica temperatura final en el proceso de expansión, y T_1 : indica la temperartura final del proceso de admisión, todo esto es observado analógicamente, como por ejemplo el calor (Q_{OUT}) es disminuido también a volumen constante, el rendimiento térmico de ciclo, (η_t) se puede calcular mediante la ecuación numero 3.

$$\eta_t = \frac{Q_{in} - Q_{out}}{Q_{in}} = \frac{C_v \cdot (T_3 - T_2) - C_v \cdot (T_4 - T_1)}{C_v \cdot (T_3 - T_2)} \quad 3$$

Se obtiene tranformaciones adiabáticas de la compresion 1,2 y de expansion 3,4 da como resultado lo siguiente

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma-1} \quad 4$$

$$\frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{V_4}{V_3}\right)^{\gamma-1} \quad 5$$

De las ecuaciones antes mencionadas, γ : indica el coeficiente de dilatacion adiabática, entre los coeficiente caloríficos a presion y volumen constante, si consideramos que $V_1 = V_4$ y $V_2 = V_3$, se da como resultado.

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{T_3}{T_4} \gg \frac{T_4}{T_1} = \frac{T_3}{T_2} \quad 6$$

Si metetemos esta relación en la formula de rendimiento térmico (ecuación 3) igualmente existe la relación de las temperaturas T_1 y T_2 de la fase 1,2 de la compresión adiabática, de esto se tiene la siguiente expresión para calcular el rendimiento térmico.

$$\eta_t = 1 - \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{\gamma-1} \quad 7$$

Relación de compresión (r_c) se da por la relación existente, entre volúmenes iniciales finales, se indicará la siguiente formula.

$$r_c = \frac{V_1}{V_2} \quad 8$$

Si reemplamos en la ecuación 8 y en la 7, el rendimiento térmico podría determinarse en función a la relación de compresión del motor, en la ecuación 9, tal cual se evidencia a continuación

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{(r_c)^{\gamma-1}} \quad 9$$

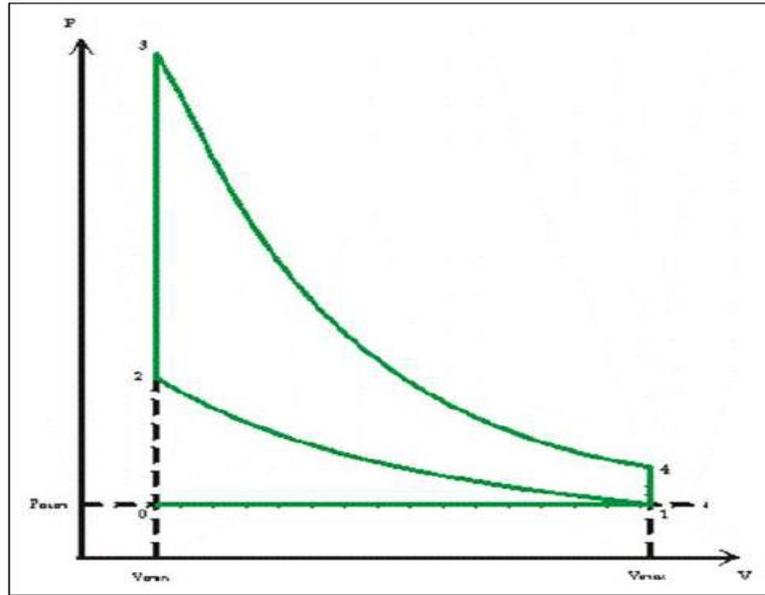


Figura 3 – Ciclo Otto teórico – Instituto mexicano del transporte [18].

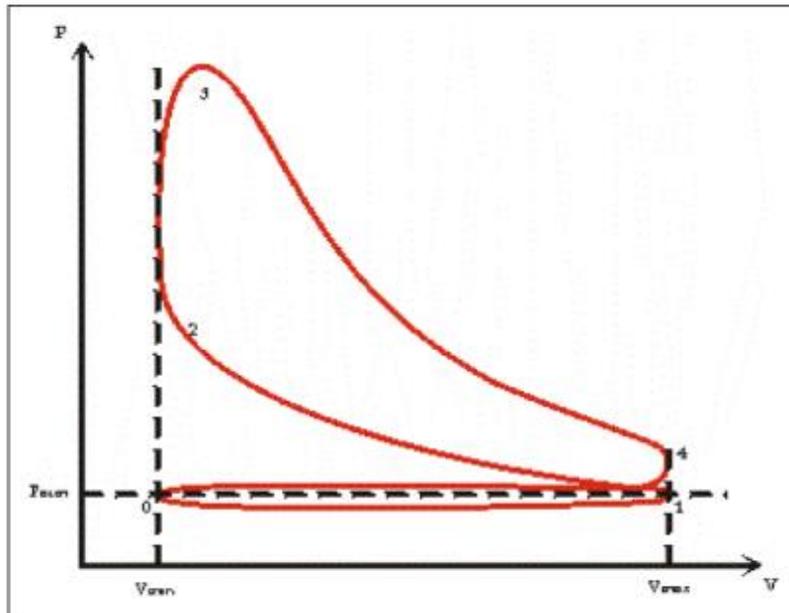


Figura 4 – Ciclo Otto real – Instituto mexicano del transporte [17].

2.5 Partes del motor

Los motores de combustión interna, los motores de dos tiempos y los 4 tiempos, como objetivo final de cada sistema de alimentación, distribución, encendido, refrigeración y por último lubricación es terminar en las siguientes partes:

- Bloque de motor
- Culata
- Carter

Estas son las 3 parte importantes del motor, porque como ya sabemos el objetivo es terminar aquí para cumplir su funcion.

2.6 Bloque del motor

Esta parte del motor es la mas grande tiene como nombre bloque, en este se instalan los cilindros, donde los pistones suben y bajan, igualmente se intalan los espárragos unidos con la culata, y pasan los circuitos de refrigeración y lubricación.

Los materiales con los cuales esta compuesto el bloque, son materiales que resisten altas temperaturas, debido a que aquí se realizan los procesos expansión y escape de gases

Por lo general el bloque esta construido con aleaciones de hierro con aluminio, se le aplica pequeñas cantidades de cromo y niquel. Con esta aleación tenemos un material sin porosidad, resistente a las altas temperaturas y al desgaste [16].

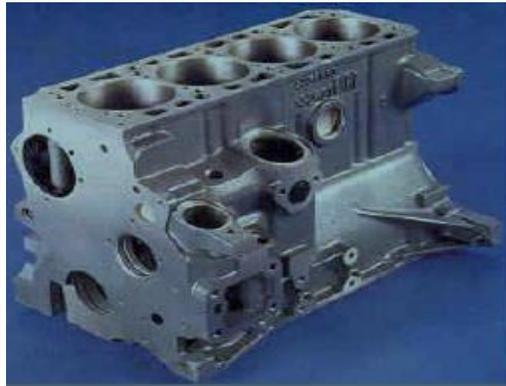


Figura 5 – Bloque de motor – Documento motores de combustión interna [16].

2.7 Cilindros

En esta parte es donde los pistones realizan sus carreras de admisión, compresión, expansión y escape, esta cavidad es de forma cilíndrica

Dentro de estos las paredes son totalmente lisas y se fabrica en acero aleados con niquel, molibdeno y cobre, en cierto caso se realiza el proceso de aleación con cromo para hacerlo mas resistente al desgaste.

Se adaptan camisas en los cilindros estas son instaladas a presión entre bloque ny cilindro, la cual es el elemento de cambio o se puede modificar en tal caso sea reparación. Con esto tenemos que el bloque este mas alejado del calor y se podría utilizar materiales mas ligeros, por ejemplo, tenemos el aluminio para su construcción [16].

2.8 Pistones

Esta parte del motor se encarga de la fuerza que es generada por medio de la explosión a la biela, para que esta termine de hacer el trabajo.

Estos están sometidos a esfuerzos de fricción como de calor, los pistones se fabrican de materiales con alta resistencia al calor y de esfuerzo físico, pero teniendo en cuenta que se debe utilizar materiales ligeros, con esto aumentaremos la velocidad y rotación máxima, normalmente se fabrican de aleaciones de aluminio-silicio, níquel y magnesio en fundición.

Mejoramos el rendimiento del motor y fallas contruyendo pistones sin falda, es decir reducimos el rozamiento del pistón con el cilindro, porque el parte que roza es mucho menor [16]



(Pistón convencional)



(Pistón sin falda)

Figura 6 – Pistones – Documento motores de combustión interna [16]

2.9 Anillos

Esta parte del motor va montada en la parte superior del cilindro, ocupando toda su circunferencia, para mantener una excelente compresión sin que exista algún tipo de fuga.

A los anillos también se les llama segmentos, se encargan de mantener la estanqueidad de la compresión en la cámara de combustión.

También es montado un anillo de empuje, este lubrica el cilindro específicamente, estos anillos suelen fabricarse en hierro aleado con silicio, níquel y magnesio [16].

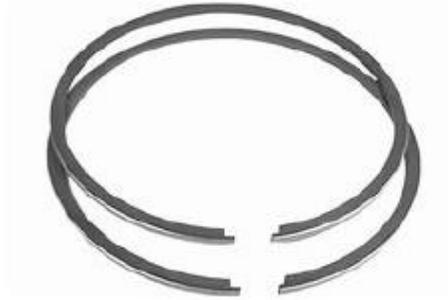


Figura 7 – Anillos – Documento motores de combustión interna [16]

2.10 Bulones

Este elemento es usado para unir el pistón con la biela la cual permite la articulación de la unión. La fabricación de los bulones normalmente se construye de acero cementado y templado, con alguna cantidad de carbono, cromo, magnesio y silicio. El bulón está fijado para evitar que se salga [16].



(Bulón)

Figura 8 – Bulón – documento Motores de combustión interna [16].

2.11 Bielas

Pieza importante encargada de transmitir al cigüeñal la cantidad de fuerza transmitida por el pistón.

Están sometidas a esfuerzos de compresión tracción y flexión muy fuertes por eso su fabricación es con materiales muy resistentes, pero deben de ser muy ligeros, por lo

general están fabricados acero al cromo-molibdeno, con silicio y magnesio, acero cromo vanadio o al cromo niquel.

Tienen tres partes fundamentales, pie, cuerpo y cabeza, el pie es aquel que une al piston por medio del bulón, el cuerpo de encarga de dar rigidez y la cabeza rota sobre el codo del sigueñal.



Figura 9 – Biela de un motor – Documento motores de combustión interna [16]

2.12 Culata

Se encuentra en la parte superior del motor, ahí se encuentran las válvulas de admisión y de escape, eje de levas, las bujías y por ultimo la cámara de combustión, en ella encontramos la caja de distribución.

La culata tiene conductos de refrigeración y lubricación como el bloque motor, ya que por aquí pasan los líquidos [16].

2.13 Carter

Parte inferior del motor, esta ubicado el sigueña, los cojinetes de cigüeñal y volante de inercia.

Es depositado el aceite del sistema de lubricación, en la parte inferior de encuentra un tapon por donde se drena el aceite, debido a la alta temperatura debe tener una excelente

refrigeración, con esto mantiene una temperatura optima del aceite esta temperatura se encuentra normalmente entre 80 y 90 grados [16].



Figura 10 – Cartes de un motor – Documento motores de combustión interna [16].

3. Aparato experimental

En las instalaciones de la Universidad Antonio Nariño se encuentra en el laboratorio experimental un motor de combustión interna Yamaha EF2600D, el principal objeto de estudio es llevar a cabo los análisis termodinámicos de los procesos y parámetros asociados a un motor de combustión interna.

3.1 Descripción del motor de combustión

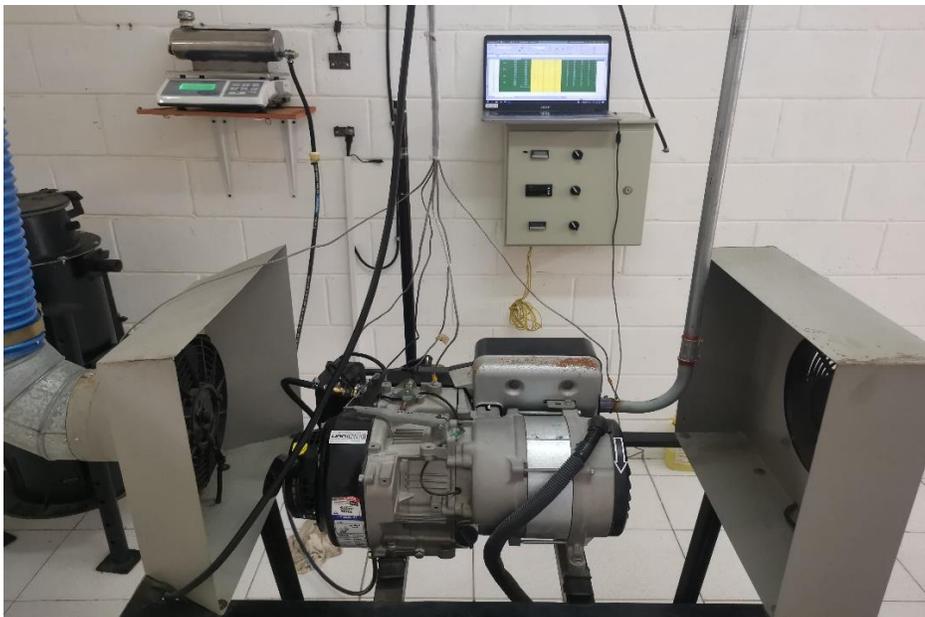


Figura 11 - Motor de Combustión Interna de la UAN - Sede Puerto Colombia

Fuente: Autores

Tabla 2 – Características técnicas del motor-generador Yamaha

Motor		Generador	
Marca	YAMAHA	Marca	YAMAHA
Modelo	MZ175	Voltaje	120 VAC / 12 VDC
Tipo	4T OHV	Potencia Max	2600 W
Potencia	5,5 HP	Potencia Nom	2300 W
Combustible	Gasolina	Corriente Nom	19,2 / 9,58 A
Consumo de combustible	1,20 l/h	Sis. Reg. Voltaje	Condensador
Sistema de arranque	Manual	Tipo	Sin escobillas

Fuente: Manual YAMAHA EF2600D

Para tener un mejor conocimiento y operación del motor de combustión interna es necesario saber que, éste cuenta con 14 partes, como se muestra en la en la Figura 12.

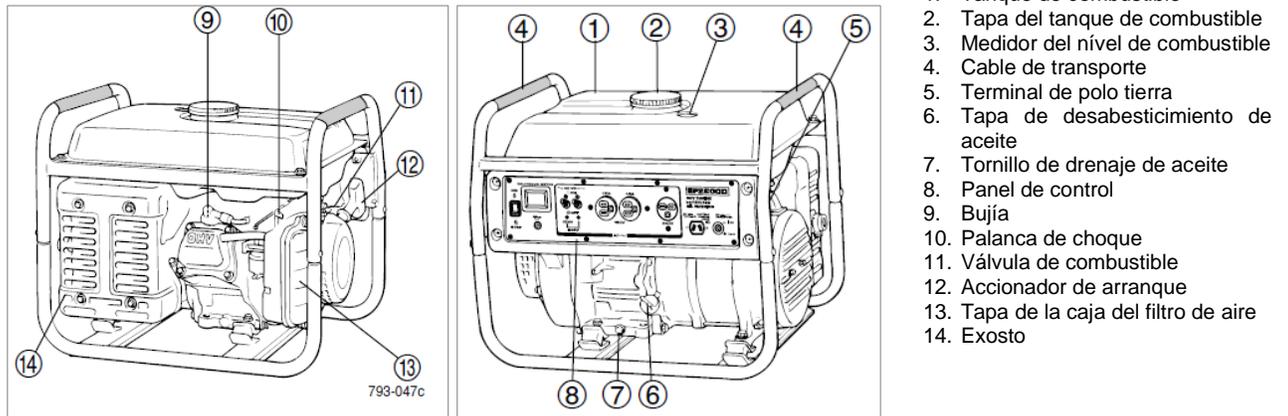


Figura 12 – Partes del Motor de Combustión Interna

Fuente: Manual YAMAHA EF2600D

En el panel de control (parte 8), esta ubicado el sistema eléctrico del motor. La Figura 13 presenta un plano de detalle, donde muestra siete partes de este sistema.

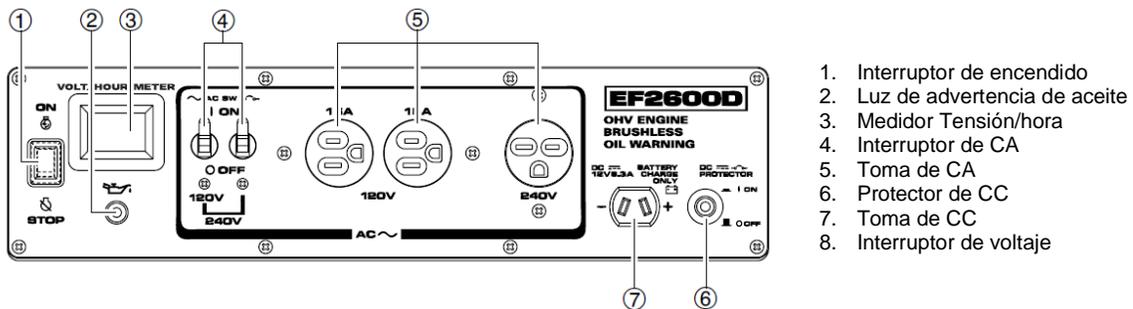


Figura 13 – Panel de Control del Motor de Combustión Interna

Fuente: Manual YAMAHA EF2600D

3.2 Procedimiento experimental

Una vez descrito el motor de combustión interna y sus partes, se presentará el diseño metodológico realizado. Para el desarrollo del proyecto se desarrollo de una revisión preliminar del estado del arte, una vez terminado el estado del arte se continuo con el plan de trabajo el cual se describe acontinuacion, basándonos en cada uno de los objetivos específicos formulados. Inicialmente, se inspecciono previamente los componentes mecánicos para asi saber cuales debían ser reemplazados y/o proceder a realizar un

mantenimiento preventivo. Para así darles cumplimiento a los objetivos, se tiene:

Objetivo específico #1: *Identificar en la literatura especializada el estado del arte de bancos de pruebas de motores de combustión interna con el fin de enmarcar el diseño conceptual del proyecto.*

- **Etapa 1:** En esta primera etapa se realizó una revisión exhaustiva de la literatura especializada para conocer en profundidad los distintos bancos de pruebas de motores existentes, ventajas, desventajas y principales aplicaciones. Para esto se hará uso de las herramientas informáticas ofrecidas por las bases de datos de la UAN.

Objetivo específico #2: *Evaluar los parámetros que caracterizan el desempeño termodinámico del motor de combustión interna (RPM, torque, potencia, relación aire-combustible, flujo másico de aire, consumo específico de combustible, eficiencia térmica, entre otros.), así como obtener las curvas características de operación.*

- **Etapa 2:** Una vez se verificó el funcionamiento y puesta en marcha el sistema PLC para la medición de temperatura, así conocida su confiabilidad metrológica. Además, implementado y evaluado metrológicamente el sistema gravimétrico para la medición del consumo específico de combustible, se procederá a determinar los parámetros asociados al motor de combustión interna. A seguir se citan algunos de los parámetros que serán determinados: RPM, consumo específico de combustible, eficiencia térmica, consumo de energía. Adicionalmente, se procederá a realizar los diagramas reales asociados a la operación del motor bajo el ciclo otto aplicando la primera ley de la termodinámica (diagrama P-v y T-v). Finalmente, las curvas características de operación tales como RPM vs Consumo de combustible, Potencia Vs RPM, entre otras, serán obtenidas en condiciones reales de operación.

Objetivo específico #3: *Identificar en la literatura especializada el estado del arte de bancos de pruebas de motores de combustión interna con el fin de enmarcar el diseño conceptual del proyecto.*

- **Etapa 3:** Esta etapa consolida la experiencia aprendida. Se realizó el diseño y la elaboración de las guías para el desarrollo de laboratorios en la asignatura Motores de Combustión Interna del Programa de Ingeniería Mecánica de la Universidad Antonio Nariño Sede Puerto Colombia.

Objetivo específico #4: *Establecer la ecuación de rendimiento del motor buscando una optimización del mismo para fines académicos e investigativo.*

Etapa 4: En esta etapa se consolidó el **Aporte Científico del Proyecto de Grado**. La ecuación de rendimiento del motor basada en la teoría consagrada de ciclos termodinámicos, particularmente, el ciclo otto, será evaluada. Además, se analizará cual sería el rendimiento del motor bajo la hipótesis que estaría funcionando bajo un ciclo de Carnot. Esto permitirá establecer la máxima eficiencia del motor y, consecuentemente, identificar aspectos de mejora que puedan ser aplicados en el motor para trabajos futuros.

3.3 Actividades Previas

En este capítulo daremos a conocer las adecuaciones y reparación que se realizaron en el transcurso del desarrollo de la puesta en marcha del motor.

3.3.1 Tanque para combustible

Este elemento del sistema el cual cumple una función muy importante se encontraba en mal estado, presentaba fugas de combustible por la mirilla y en la tapa de suministro, su diseño no era el adecuado para el procedimiento de medición de consumo de combustible, se procesó a realizar diseño del tanque y a su vez la realización del mismo. como se muestra en la figura.



Figura 14 – modificación de tanque de combustible en acero inoxidable.

Fuentes: Autores

En el transcurso de las Actividades también se encontró que la manguera que suministra combustible al motor presentaba deterioro la cual se procedió a cambiar, se le instaló al sistema de suministro de combustible un filtro el cual evitara el paso de las impurezas que se encuentran en el combustible o el tanque y así evitaremos que estas pasen al carburador del motor a generar fallas en el funcionamiento.



Figura 15 – Sistemas de filtrado de combustible

Fuente: Autores

3.3.2 Carburador

Este elemento se encontró obstruido a la hora de realizar la primera prueba del motor, este se desinstalo y se le realizo mantenimiento en donde se encontró que el chicler se encontraba obstruido y no permitia el paso del combustible, luego de este procedimiento se procedio a instalar el carburador en donde quedo operativo.



Figura 16 – Mantenimiento a carburador del Generador YAMAHA

Fuentes: Autores

3.3.3 Organización del cableado

Se realizó mantenimiento y peinado del cableado de circuito de control del sistema de medición de temperatura, peinado cable de sensores los cuales van ubicados en el motor de combustión Interna. Verificación visual del tablero, limpieza, ajuste de bornes a componentes electricos.



Figura 17 – Organización de cableado a tablero eléctrico y sensores instalados al motor.

Fuente: Autores

3.3.4 Mantenimiento del motor de combustión

Se realiza mantenimiento preventivo a motor de combustión interna y a Generador YAMAHA, incluye: mantenimiento de carburador, cambio de aceite, limpieza de ventiladores, limpieza de ducto de toma de aire, calibración de válvulas de admisión y escape.



Figura 18 – Mantenimiento a motor YAMAHA

Fuente: Autores

3.3.5 Montaje de bascula

se realizo instalación de báscula de marca TRÚMAX (Modelo: Fénix; Número de Serie: YS200847; Resolución: 1 g; Cap. Máx.: 15 kg. Esta báscula tendrá será utilizada para medir el consumo de combustible del motor de combustión interna.



Figura 19 – Instalacion de bascula TRÚMAX

Fuente: Autores

3.4 Parametros asociados al motor de combustión

Los parámetros que se asociaran al motor son el consumo de combustible, medición de temperatura y medición de RPM.

3.4.1 Sistema de medición de combustible



Figura 20 – Sistema demedicion de combustible Tanque de almacenamiento – Bacula TRÚMAX

Fuente: Autores

Este sistema esta conformado por un tanque de combustible el cual esta sobre una bascula TRÚMAX calibrada, esta bascula es la encargada de medir el peso que tiene el tanque de combustible, esto nos ayudara a tener unos datos exactos los cuales nos servira para poder calcular la cantidad de combustible que esta consumiendo la planta en operacion, en un determinado tiempo.

3.4.2 Sistema de medición de temperatura

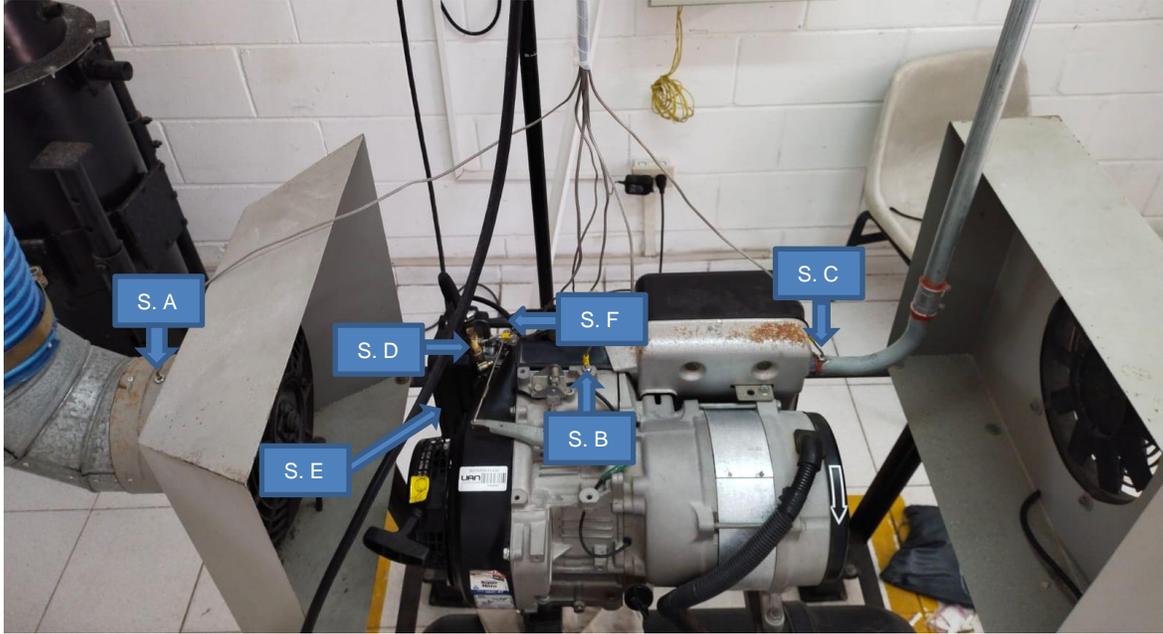


Figura 21 - Ubicación de sensores en motor de combustión interna

Fuente: Autores

El sistema de medición de temperatura está constituido por una serie de sensores que están conectados en puntos estratégicos del motor, para tomar los parámetros remotamente y así poder sacar los cálculos de eficiencia del motor. La ubicación de los sensores es la siguiente: sensor A el cual está ubicado en el ducto de toma de aire, sensor B está ubicado en la carcasa del motor, sensor C está ubicado en el ducto de escape, sensor D está ubicado en la entrada de combustible, sensor E está ubicado en la admisión de aire del motor y el sensor F está ubicado en la combustión del motor.

4. Resultados y discusión

Esta sección presenta los principales resultados obtenidos en el proyecto de grado experimental. Dos bloques comprenden esta sección. La primera parte muestra todo el análisis desarrollado a partir de los datos experimentales obtenidos en el laboratorio. La segunda parte presenta la estructura de una guía para el uso del motor de combustión.

4.1 Medición experimental de parámetros

El desarrollo experimental del trabajo de grado fue fundamentado en la medición de los siguientes parámetros: medición de temperatura, medición de RPM, medición de la masa del combustible. La Tabla 3 muestra los distintos parámetros medidos:

Tabla 3 – Datos experimentales

Tiempo (s)	RPM	Masa inicial, Mi (g)	Masa Final, Mf (g)	Mi - Mf (g)	Densidad Gasolina (g/l)	Volumen Consumido (ml)	T2	T3	T4	T5	T6
60	2000	3905	3890	15	680	22.06	49	190	32	34	55
60		3890	3881	9	680	13.24	50	197	32	34	54
60		3881	3876	5	680	7.35	50	200	32	34	51
60		3876	3870	6	680	8.82	51	203	32	34	51
60	2500	3860	3856	4	680	5.88	51	209	33	34	51
60		3856	3851	5	680	7.35	51	209	33	34	51
60		3851	3846	5	680	7.35	51	208	33	34	51
60		3846	3840	6	680	8.82	52	209	33	34	51
60	3000	3837	3833	4	680	5.88	52	209	33	34	52
60		3833	3826	7	680	10.29	52	208	33	34	52
60		3826	3821	5	680	7.35	52	208	33	34	52
60		3821	3816	5	680	7.35	52	209	33	34	52
60	3400	3812	3805	7	680	10.29	53	210	33	34	52
60		3805	3800	5	680	7.35	53	210	33	34	52
60		3800	3792	8	680	11.76	53	210	34	34	52
60		3792	3786	6	680	8.82	53	210	34	34	52

En la tabla anterior se muestran, entre otros parámetros, las distintas temperaturas asociadas a la medición de los procesos termodinámicos. Fueron tomados cuatro puntos con el fin de calcular el valor medio y la incertidumbre asociada a la medición de cada parámetro. Los termómetros para la medición de la temperatura fueron calibrados utilizándose patrones pertinentes para ese proceso experimental. Dado que el objetivo de

este trabajo no es propiamente la calibración de estos sensores, el anexo A muestra un detalle las distintas curvas de calibración obtenidas para los distintos termómetros.

Para efectos de determinar el consumo específico de combustible, el calor de entrada en el proceso, el calor de salida, el trabajo realizado y la eficiencia térmica, se estableció el valor medio entre cuatro puntos experimentalmente obtenidos.

A seguir se especifica el análisis para el consumo de combustible.

4.1.1 Consumo de combustible

El consumo de combustible es mostrado tanto en la Tabla 3 como en las Figuras 22 y 23.

Tabla 4 – Consumo específico y volumétrico de combustible

RPM	Mi - Mf (g) (promedio)	Mi - Mf (g) (Incertidumbre)	Volumen Consumido (ml) (promedio)	Volumen Consumido (ml) (Incertidumbre)
2000	7.25	1.03	10.66	1.52
2500	5.00	0.41	7.35	0.60
3000	5.25	0.63	7.72	0.93
3400	6.50	0.65	9.56	0.95

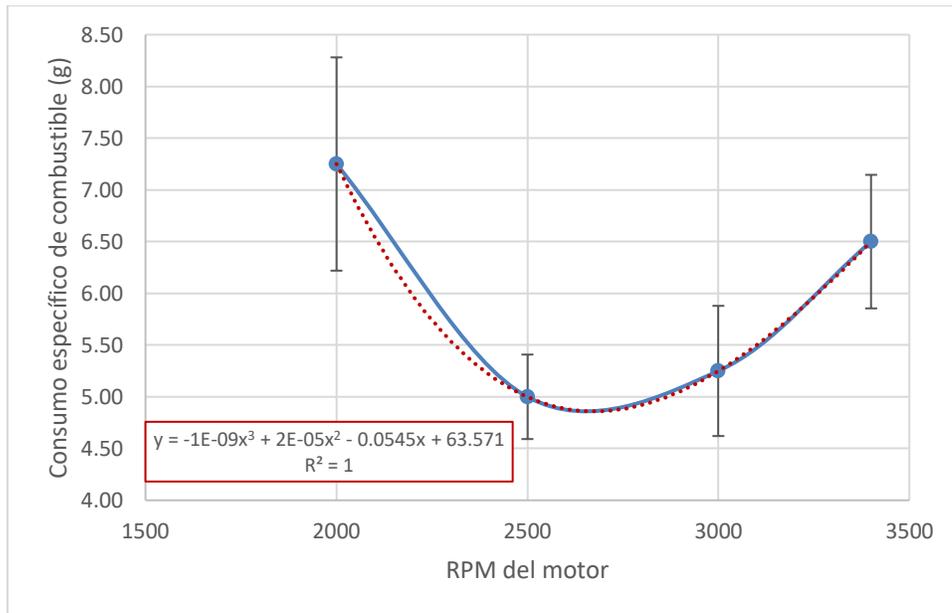


Figura 22 – Consumo específico de combustible

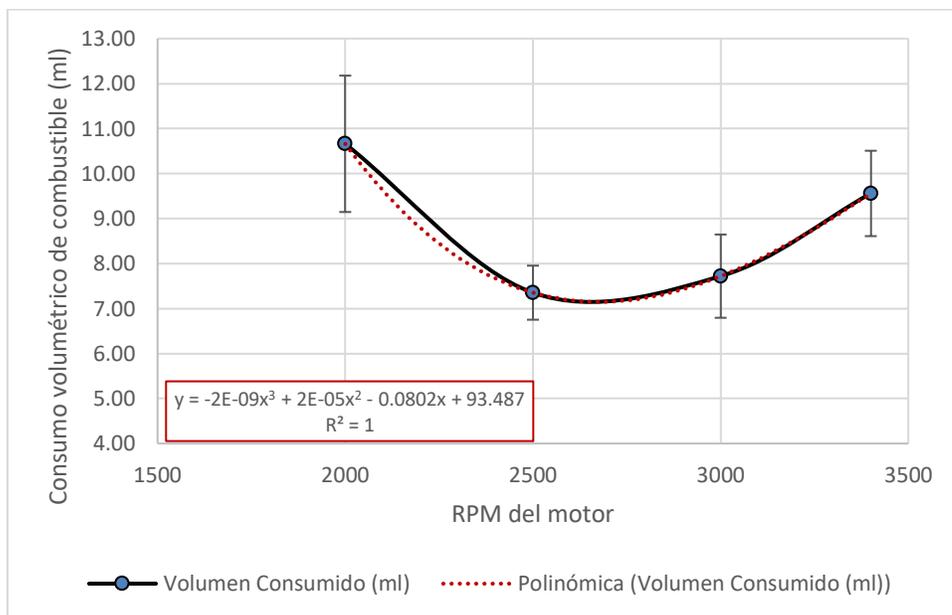


Figura 23 – Consumo volumétrico de combustible

Podemos observar en ambas figuras que a medida que aumentan las revoluciones en el tramo de 2000 a 2500 RPM el consumo de combustible disminuye paulatinamente, sin embargo, al pasar las revoluciones de 2500 RPM existe un aumento considerable en el consumo de combustible. Esto ha de esperarse una vez que el motor requiere de una mayor potencia para realizar el trabajo de convertir la energía mecánica en energía térmica. Sin embargo, una acción de mejora en este proceso es exactamente buscar mecanismos que permitan desacelerar el consumo de combustible a medida que aumentan las revoluciones del motor. Esto puede ser logrado usándose aditivos y/o combustibles alternativos. Cada una de las figuras presenta la ecuación de rendimiento del motor que corresponde a un polinomio de cuarto grado.

4.1.2 Calor de entrada (Q_{in}), calor de salida (Q_{out}) y trabajo

Uno de los parámetros más importantes en el motor es el análisis de calor de entrada y calor de salida en el proceso. Esto debido a que a partir de estos valores será posible determinar el trabajo realizado por el motor y, posteriormente, la eficiencia térmica en el proceso. La Tabla 5 presenta los valores medios para uno de los puntos de RPM analizados. Estos valores fueron calculados utilizándose las ecuaciones 1 y 2 presentadas en el capítulo 2.

Tabla 5 – Calor de entrada (Q_{in}), calor de salida (Q_{out})

RPM	Q_{in} (kJ)	Q_{out} (kJ)
2000	105.91	13.46
2500	113.09	12.21
3000	112.37	12.92
3400	112.73	12.92

Por otro lado, la Figura 24 ilustra de forma clara la relación lineal que existe entre los calores de entrada y salida en sintonía con el aumento de las RPM en el motor. Sin embargo, a pesar de esta relación lineal existir, se puede notar que el calor introducido al motor en el proceso de la compresión y combustión (Q_{in}) es mucho mayor que calor desprendido por el motor en el proceso de la expansión y el escape (Q_{out}). Esta diferencia importante puede ser apreciada en la Figura 24.

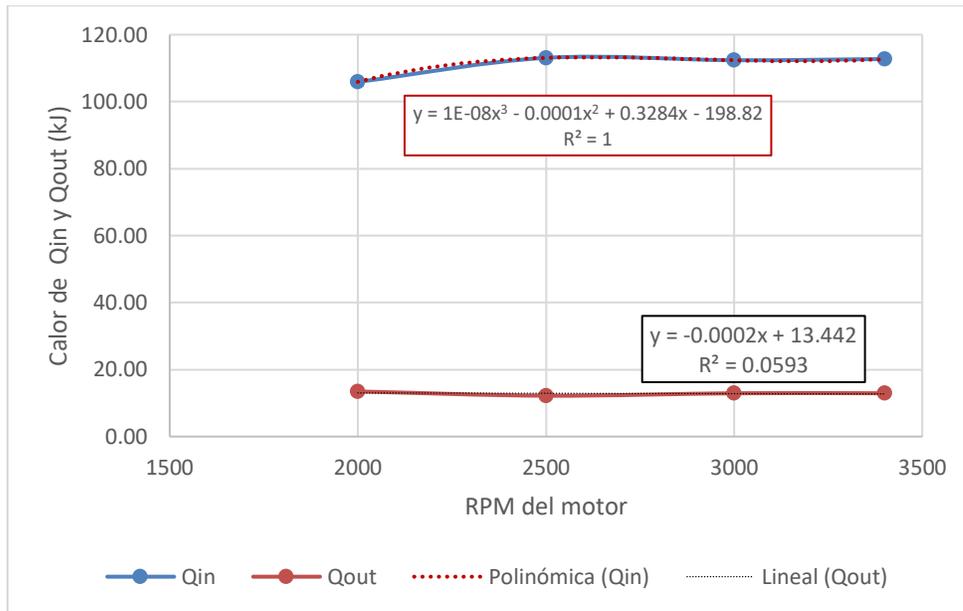


Figura 24 – Calor de entrada al proceso (Q_{in}) y calor perdido en el proceso (Q_{out})

Lo anterior confirma que las actividades previas realizadas para el funcionamiento y operación del motor resultaron altamente efectivas una vez que se observa una relación cuasi constante entre el calor de entrada y salida. Esto confirma un alto trabajo realizado por el motor a partir de la diferencia $Q_{out} - Q_{in}$. Esto se aprecia de forma clara en la Figura 25.

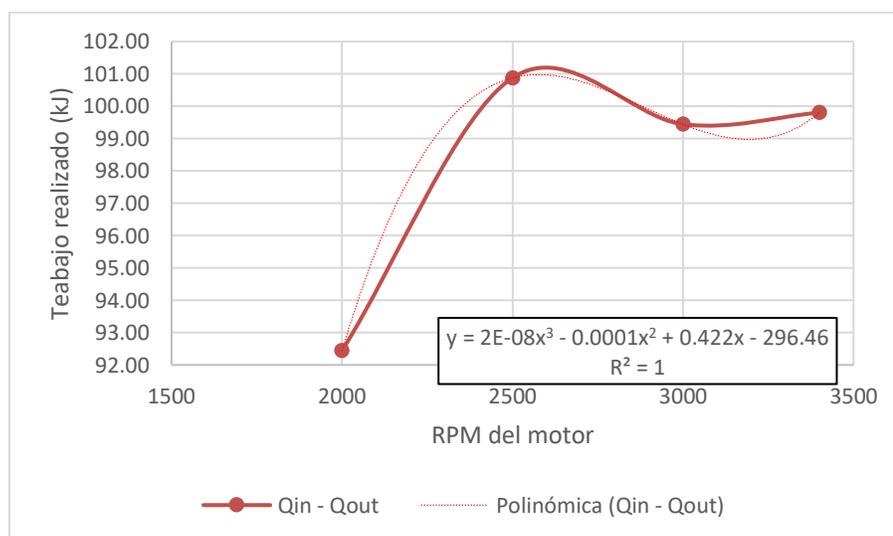


Figura 25 – Trabajo realizado

4.1.3 Eficiencia térmica y ecuación de rendimiento térmico

La eficiencia térmica del motor fue calculada para cada uno de los puntos experimentales asociados a las revoluciones por minuto del motor de combustión interna. Se puede observar en la Figura 26 la curva de eficiencia térmica (en azul) que muestra un aumento en la eficiencia del motor entre 2000 RPM y 2500 RPM. Posterior a este valor inicia un pequeño descenso en su eficiente térmica. Esto puede ser explicado al consumo de combustible en este tramo que, como ya fue explicado en las secciones anteriores, aumenta a medida que aumentan las revoluciones del motor. Sin duda, esto representa una incuestionable oportunidad de mejora en el rendimiento térmico del motor.

En relación con la ecuación de rendimiento, esta corresponde a un polinomio de tercer grado. A partir de esta ecuación de ajuste polinomial encontrado aplicando el método de los mínimos cuadrados ordinarios, es posible determinar la eficiencia térmica del motor en función de las RPM. En esta ecuación el parámetro x denota las RPM del motor y el parámetro y denota la eficiencia térmica. Esto constituye en una contribución importante del presente proyecto de grado, además de atender uno de los objetivos específicos originalmente formulado en el capítulo introductorio.

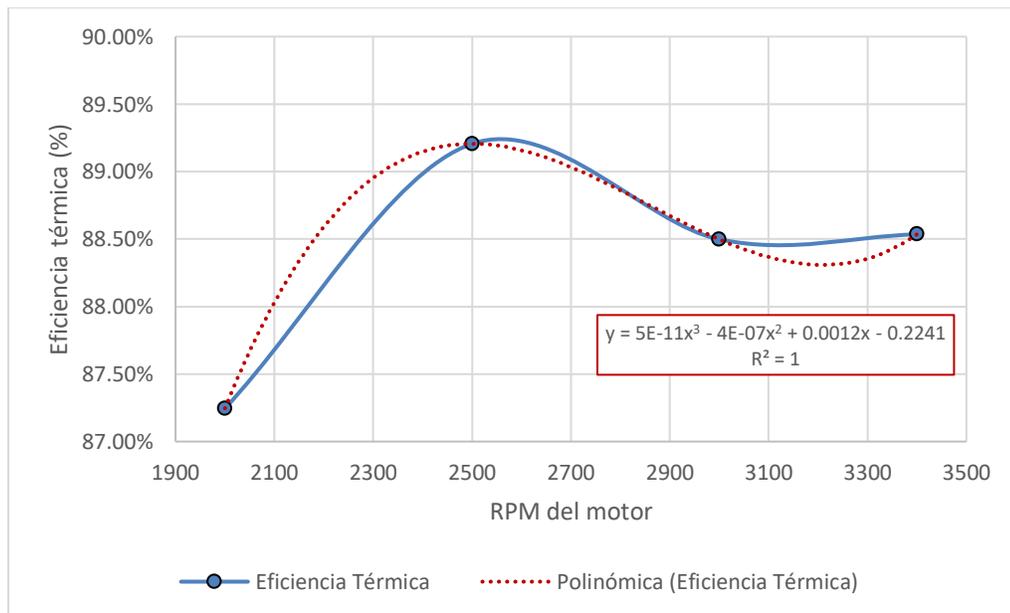


Figura 26 – Eficiencia térmica y ecuación de rendimiento

4.2 Construcción de la guía de laboratorio

Una vez descrita la medición de parámetros termodinámicos obtenidos en laboratorio, fue posible establecer una guía de laboratorio que será de utilidad para las practicas académicas realizadas en el programa de ingeniería mecánica de la UAN-Sede Puerto Colombia. A seguir se describe la guía de laboratorio elaborada y formulada:

GUÍA DE LABORATORIO MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO SEDE PUERTO COLOMBIA

Datos de identificación	
Programa Académico:	Asignatura:
Ingeniería Mecánica	Motores de combustión
Código:	Plan de estudios:
Practica N.º 1	Fecha de actualización: 20 de octubre del 2020

Introducción

Teniendo en cuenta el origen y la evolución de los motores de combustión interna en el tiempo, nos damos cuenta que en su inicio cada elemento que lo compone es imprescindible para su funcionamiento. Este también es una máquina que se categoriza completa y esto la lleva hacer funcional, ya que es una maquina productora de energía mecánica, Antes del siglo XIX tenemos algunos ejemplos de motores que a la llegada del petróleo en la producción comercial se realizaron mejoras las cuales fueron importantes, con el fin de ser siglo hubo diferentes tipos de motores que estaban siendo utilizados en diferentes aplicaciones. Los motores de combustión interna a pesar de ser muy importante en el sector de la industria, transporte, etc. Presenta problemas con la alta contaminación de CO₂, en el aire y

sin dejar atrás la gran dependencia del petróleo que no es una materia prima infinita que con el pasar de los años esta se va a agotar. Estas máquinas aun teniendo estas desventajas son indispensables y las cuales son fabricadas en diferentes modelos y gamas dependiendo el uso que se le va a dar teniendo en cuenta la potencia que se requiera.

Objetivos

Comprender los fundamentos que rigen el funcionamiento de los Motores de combustión interna alternativos y rotativos, y sus aplicaciones.

Calcular los parámetros operativos de los Motores de combustión interna alternativos y rotativos

Interactuar con los motores de combustión interna alternativos en el laboratorio.

Competencias que los estudiantes desarrollaran

1. Competencias institucionales:

2.

- a. Pensamiento matemático.
- b. Competencias investigativas.
- c. Competencia en Ciencia, tecnología y manejo de la información.
- d.

3. Competencias del Programa Académico:

- Identificar, formular y resolver problemas complejos de la ingeniería mecánica mediante la aplicación de los principios de la ingeniería la ciencia y las matemáticas
- Aplicar el diseño mecánico para producir soluciones que resuelvan problemas y consideren el contexto social, económico y ambiental
- Desarrollar y conducir experimentos y analizar datos, con criterio ingenieril para extraer conclusiones.

Metodología

Modelo pedagógico: La Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica ha adoptado la implementación de una metodología educativa basada en la iniciativa CDIO

(concebir-diseñar-implementar-operar) y la Taxonomía de Bloom. La ejecución de esta metodología implica diseñar, modelar y planear procesos como también lograr alcanzar competencias cognoscitiva, interpretativa, argumentativa y propositiva.

Modalidad: Presencial

En esta asignatura se desarrollarán dos aulas de clase de 120 minutos cada semana. Serán en total 32 aulas, 24 para clases teóricas, 4 para prácticas de laboratorio y 4 para presentación de evaluaciones.

En el transcurso de la asignatura se realizan dos exámenes unificados de forma presencial. Como apoyo se utiliza la plataforma Moodle donde se incluye el contenido programático y también se realizan evaluaciones y talleres. Se realizarán 4 prácticas de laboratorio donde los estudiantes desarrollarán experiencias de aprendizaje que le darán soporte al desarrollo del resultado de aprendizaje: Conducir experimentos propios de la ingeniería.

Resultado de Aprendizaje

Competencias	Resultados de aprendizaje
Identificar, formular y resolver problemas complejos de la ingeniería mecánica mediante la aplicación de los principios de la ingeniería la ciencia y las matemáticas	<ul style="list-style-type: none">• Distinguir los principios de la mecánica de fluidos y las leyes de la termodinámica presentes en sistemas de conversión de energía.• Conocer los diferentes mecanismos de transferencia de calor y sus aplicaciones a nivel industrial
Aplicar el diseño mecánico para producir soluciones que resuelvan problemas y consideren el contexto social, económico y ambiental	<ul style="list-style-type: none">• Aplicar el pensamiento Sistémico en problemas de la Ingeniería mecánica.• Definir las necesidades de un sistema mecánico considerando las tecnologías y regulaciones existentes.
Desarrollar y conducir experimentos y analizar datos, con criterio ingenieril para extraer conclusiones.	<ul style="list-style-type: none">• Conducir experimentos propios de la ingeniería• Probar hipótesis formuladas en áreas propias de la ingeniería mecánica.

Procedimiento

Al iniciar la actividad de la guía de laboratorio primeramente se debe verificar los líquidos del motor como gasolina y aceite, se debe verificar el funcionamiento de los equipos de

medición y que los instrumentos se encuentren completos, verificar que la válvula del paso del combustible este abierta, al terminar la revisión se debe dar arranque al motor, se debe ajustar las RPM del motor realizando las mediciones con el tacómetro hasta llegar a las 3400 RPM, con esto se dará inicio al proceso de la guía laboratorio.

Medición de consumo de aire

- Comprobar las unidades de velocidad en [m/s] del anemómetro y el cronometro en [s].
- Iniciar marcha del motor durante unos minutos para eliminar gases y residuos para una mejor toma de datos.
- Ubicar el anemómetro en la entrada de aire del motor para realizar las tomas de lectura de la velocidad y la temperatura del aire durante un minuto.

Calculos para hallar el consumo de aire

Parámetro	Correlación
$\dot{m}_a =$ flujo masico de aire [gr/s]	$\dot{m}_a = V_{anem} * A * \rho$

Donde, V_{anem} : velocidad anemómetro; A: área transversal manguera $2.124 \times 10^{-3} m^2$; ρ : densidad aire $1210 \text{ gr}/m^3$

Medicon de consumo de combustible

- Verificar las unidades de la báscula y el cronometro.
- Iniciar marcha del motor durante unos minutos para eliminar gases y residuos para una mejor toma de datos.
- Ubicar los instrumentos de medición para empezar a tomar lectura de la báscula que es la cantidad inicial de combustible y pasado un minuto hacer la lectura de la cantidad final de combustible.
- Tabular en el formato la toma de datos.

Calculo para hallar el consumo especifico de combustible

Parámetro	Correlación
$sfc =$ Consumo especifico de combustible [gr/Kw-hr]	$Sfc = \dot{m}_f / \dot{w}$

\dot{m}_f = Flujo másico de combustibles [gr/s]	$\dot{m}_f = \rho_{in} - \rho_{inf} / t$
---	--

Donde, \dot{m}_f : flujo masico de combustible; \dot{w} : potencia en [kw]; ρ_{in} : peso de combustible inicial; ρ_{inf} : peso de combustible final t: tiempo de prueba

Formatos para toma de datos

Consumo de aire

PRUEBAS	RPM	FLUJO MASA DE AIRE				
		Velocidad Aire [m/s]	Área [m ²]	Temperatura [K]	Densidad [Kg/m ³]	\dot{m} [gr/s]
1	2000		2,124		1,21	
2			2,124		1,21	
3			2,124		1,21	
4			2,124		1,21	
5	3400		2,124		1,21	

Consumo específico de combustible

PRUEBAS	RPM	FLUJO MASA COMBUSTIBLE \dot{m}_f [gm/s]				Tiempo [s]	\dot{m} [gr/s]	CONSUMO ESPECIFICO DE COMBUSTIBLE SFC [gr/Kw-hr]
		Peso[gr]						
		ρ_{in}	ρ_{inf}	ρ_{tot}				
1	2000				60			
2					60			
3					60			
4					60			
5	3400				60			

Relación Aire Combustible AF

Con los resultados de las tablas anteriores del consumo específico de combustible y consumo de aire podemos hallar la relación AF con solo remplazar [\dot{m}_a / \dot{m}_f]

RELACION AF	RPM 2000	RPM	RPM	RPM	RPM 3400
[\dot{m}_a / \dot{m}_f]					

5. Conclusiones y recomendaciones

Este trabajo de grado permitió desarrollar experimentalmente un análisis termodinámico de los procesos y parámetros asociados al motor de combustión del laboratorio de experimentos de la UAN Sede Puerto Colombia. De esta manera un activo fijo de la Universidad Antonio Nariño fue recuperado convirtiéndose en una mejora que contribuye al fortalecimiento de los procesos académicos y de renovación del registro calificado del programa de Ingeniería Mecánica de la Universidad Antonio Nariño Sede Puerto Colombia.

En relación a la solución de los objetivos originalmente formulados, este trabajo de grado contribuyó un mayor conocimiento de la literatura especializada en relación a los motores de combustión interna, su funcionamiento, ecuacionamiento y análisis experimental. Adicionalmente, fue posible conocer el rendimiento termodinámico del motor así como establecer una curva de rendimiento la cual permitirá conocer la eficiencia térmica del motor para cualquier revolución que se encuentre entre 2000 y 3400 RPM.

Finalmente se elaboró una guía de laboratorio que permitirá a los usuarios finales del motor de combustión desarrollar de forma orientada las distintas practicas que pueden ser realizada en el banco de prueba del motor de combustión interna.

A partir de la experiencia aprendida se recomiendan los siguientes aspectos en pro avanzar con otros trabajos en este tipo de estudio:

- Realizar practicas experimentales con otro tipo de combustible distinto a la gasolina para evaluar el desempeño del motor de combustión interna.
- Realizar un análisis de vibraciones en el motor y su efecto en el consumo específico de combustible.
- Realizar un análisis de incertidumbre robusto asociada la eficiencia térmica del motor de combustión a partir de la medición de parámetros como la presión de los distintos procesos con transductores diseñados para tal fin.

Bibliografía

- [1] W. W. Pulkrabek, "Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine, 2nd Ed.," *J. Eng. Gas Turbines Power*, vol. 126, no. 1, p. 198, Mar. 2004, doi: 10.1115/1.1669459.
- [2] R. Mikalsen and A. P. Roskilly, "A review of free-piston engine history and applications," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 27, no. 14–15, pp. 2339–2352, 2007, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2007.03.015.
- [3] M. Muruganandam and P. C. Mukesh Kumar, "Experimental analysis on internal combustion engine using MWCNT/water nanofluid as a coolant," *Mater. Today Proc.*, vol. 21, pp. 248–252, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2019.05.411.
- [4] J. Duarte, W. Orozco Lozano, J. González Coneo, E. Buelvas Castro, and L. Corredor Martínez, "Thermodynamic Analysis of Self-Ignition in Spark-Ignited Engines Operated with Alternative Gaseous Fuels," *Tecciencia*, vol. 11, no. 20, pp. 57–65, 2016, doi: 10.18180/tecciencia.2016.20.8.
- [5] G. A. Diaz *et al.*, "Maximum power from fluid flow by applying the first and second laws of thermodynamics," *J. Energy Resour. Technol. Trans. ASME*, vol. 139, no. 3, pp. 1–8, 2017, doi: 10.1115/1.4035021.
- [6] U. Norte *et al.*, "Una revisión del desempeño mecánico y ambiental," 2003.
- [7] "AgudeloJohn_2003_ModelacionRenovacionCarga.pdf." .
- [8] A. S. Ramadhas, S. Jayaraj, and C. Muraleedharan, "Theoretical modeling and experimental studies on biodiesel-fueled engine," *Renew. Energy*, vol. 31, no. 11, pp. 1813–1826, 2006, doi: 10.1016/j.renene.2005.09.011.
- [9] G. Fernando, G. Sánchez, J. Luis, C. Velasco, and A. C. Guerrero, "García Gabriel. 2013. Modelado de la combustión en motores Diésel.," *Rev. Ion*, vol. 26, no. 1, pp. 41–54, 2013.
- [10] J. Duarte *et al.*, "Auto-ignition control in turbocharged internal combustion engines operating with gaseous fuels," *Energy*, vol. 71, pp. 137–147, 2014, doi: 10.1016/j.energy.2014.04.040.
- [11] C. Irapuato-salamanca, "Diseño de un banco de prueba para motores de combustion interna," no. 1.
- [12] E. de J. Gálvez Sandoval, "Diseño De Un Banco De Pruebas Para Motores De

- Combustión Interna,” no. 1, p. 166, 2013.
- [13] J. Duarte, J. Garcia, J. Jiménez, M. E. Sanjuan, A. Bula, and J. González, “Auto-Ignition Control in Spark-Ignition Engines Using Internal Model Control Structure,” *J. Energy Resour. Technol. Trans. ASME*, vol. 139, no. 2, pp. 1–11, 2017, doi: 10.1115/1.4034026.
- [14] H. Narvárez Pallares, S. Villareal Acosta, J. Duarte Forero, and A. Rincón Montenegro, “Implementación de un banco para pruebas en motor Diésel monocilíndrico con aplicaciones investigativas,” *Sci. Tech.*, vol. 22, no. 4, pp. 330–340, 2017, doi: 10.22517/23447214.16111.
- [15] J. T.-T. Juan Trujillo-Tello, C. Padilla-Padilla, L. Buenaño-Moyano, and B. Cuaical-Angulo, “Evolución y Tendencia de los Sistemas de Control de Motores de Combustión Interna Alternativos, Una Revisión Bibliográfica,” *Ingenio*, vol. 3, no. 2, pp. 5–14, 2020, doi: 10.29166/ingenio.v3i2.2718.
- [16] “GaviriaJorge_2002_HistoriaMotoresCombustion HISTORIA DEL MOTOR DE COMBUSTION.pdf.” .
- [17] A. Arevalo and G. Hernandez, “Motores de combustión interna.”
- [18] C. Cepeda, “Tipos de combustible de aviación,” no. 417, p. 85, 2017, [Online]. Available: <https://www.puromotores.com/13175544/tipos-de-combustible-de-aviacion>.

Anexo A: fundamentos de incertidumbre y calibración de los sensores de temperatura

Fundamentos para la estimación de la incertidumbre de medición por el método GUM (2008). El resultado de un proceso de calibración y/o medición, en ningún caso es

perfecto. Por tal motivo, existe una incertidumbre de medición que según el VIM (Vocabulario Internacional de Metrología) es un parámetro no negativo que caracteriza de forma razonable la dispersión de los valores atribuidos a un mensurando, para un nivel de confiabilidad determinado. La incertidumbre de medición es un concepto fundamental para la expresión del resultado de un mensurando, al punto que un resultado de medición es considerado incompleto si este parámetro no es informado.

• INCERTIDUMBRE TIPO A

En general si una magnitud x que varía de forma aleatoria puede determinarse a través de una serie de mediciones independientes x_i bajo condiciones de repetibilidad. El mejor estimador del valor verdadero es el promedio aritmético de los datos experimentales:

$$\bar{x} = \frac{1}{n}(x_1 + x_2 + \dots + x_n) = \left(\frac{1}{n}\right) \sum_{k=1}^n x_k . \quad (C.1)$$

Las mediciones x_k varían debido al hecho que las magnitudes de influencia (e.g.: humedad, temperatura ambiente, presión atmosférica, campos electromagnéticos) también están en constante variación. En la situación donde no se detecten variaciones considerables, es posible sea asociado a una deficiencia en la resolución del instrumento.

Para el caso de la varianza de la población (σ^2) el mejor estimador es la varianza de la muestra (s^2), que puede ser calculada a partir de la Ecuación (C.2):

$$s^2(x_k) = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (x_k - \bar{x})^2 . \quad (C.2)$$

La raíz cuadrada positiva de la varianza denota la desviación estándar (s) de los datos experimentales.

• INCERTIDUMBRE TIPO B

La incertidumbre Tipo B es aquella que no requiere de cálculos estadísticos, es decir, emplea información externa u obtenida por la experiencia. Esta incertidumbre puede ser tanto o tal vez más confiable que una evaluación Tipo A, especialmente cuando el tamaño de la muestra no es demasiado grande. Esta información puede incluir:

- Datos previos de medición
- Resolución del instrumento de medición
- Conocimiento del comportamiento y propiedades del material
- Especificaciones de fabricantes
- Datos de calibraciones y certificado
- Datos de referencia en manuales (*handbooks*).

• INCERTIDUMBRE ESTÁNDAR COMBINADA

La incertidumbre estándar combinada es la incertidumbre estándar del resultado de una medición, que se obtiene a partir de los valores de otras magnitudes. Este parámetro es igual a la raíz cuadrada positiva de una suma de términos, siendo estos términos la varianza y la covarianza de dichas magnitudes, ponderadas de acuerdo a como varía el resultado de la medición por cambios en estas magnitudes.

La $u_c(y)$ depende también de que tanto influye x sobre y . Por ejemplo, si x aparece elevada a la cuarta potencia en la función f influirá mucho más que si sólo estuviera elevada a la primera potencia. Por otro lado, el parámetro que determina que tanto influye x_i sobre y es definido como el coeficiente de sensibilidad, c_i . Matemáticamente, c_i es calculado como la derivada parcial de la función f respecto de x_i , es decir:

$$c_i = \frac{\partial f}{\partial x_i}. \quad (C.3)$$

Posteriormente, se suma cuadráticamente todas estas:

$$u_c^2(y) = [c_1 \cdot u(x_1)]^2 + [c_2 \cdot u(x_2)]^2 + \dots + [c_n \cdot u(x_n)]^2. \quad (C.4)$$

La $u_c(y)$ es una desviación estándar combinada que caracteriza, para un nivel de probabilidad de 68,27% (i.e.: 1σ), la dispersión de los valores que pueden atribuirse al resultado de una medición. La Ecuación (C.4) puede ser resumida en la siguiente expresión:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i). \quad (C.5)$$

Matemáticamente puede verse que esta Ley está basada en una expansión de primer orden de la función f en una **Serie de Taylor** alrededor de f , evaluada en cada uno de sus estimadores de entrada x_i .

• FACTOR DE COBERTURA

El factor de cobertura (k) es un coeficiente por el cual la incertidumbre estándar combinada es multiplicada para obtenerse la incertidumbre de medición expandida. El valor del factor de cobertura es seleccionado con base al nivel de confianza requerido. Este parámetro, generalmente, se encuentra entre 2 y 3. Entretanto, para aplicaciones especiales, puede estar fuera de este rango. De esta forma se tiene que: $k=1$, para 68,27% de confianza; $k=2$, para 95,45% de confianza; $k=3$, para 99,73% de confianza.

• **INCERTIDUMBRE EXPANDIDA**

La incertidumbre expandida (U) define un intervalo donde se encuentra el valor verdadero de una medición para un determinado nivel de confianza, suficientemente elevado. Esta incertidumbre expandida se obtiene de una incertidumbre estándar combinada multiplicada por un factor de cobertura, siguiendo la expresión:

$$U = k \cdot u_c(y) . \tag{C.6}$$

El resultado de la medición se expresa como:

$$Y = y \pm U . \tag{C.7}$$

La expresión anterior indica que el mejor estimado de Y es y con una incertidumbre asociada a la medición igual a U . Lo anterior es válido para un determinado nivel de confianza, el cual es definido por el factor de cobertura k . En otras palabras, el intervalo ($y - U, y + U$) abarca una fracción suficientemente grande de los valores que razonablemente puede atribuirse a Y .

Calibración de los sensores de temeperatura. Se muestra a seguir el resultado de la calibración de los sensores de temperatura.

Tabla C1 – Datos experimentales

No Puntos	Temperaturas indicadas por los sensores					Temperatura del Patrón de Medición			
	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆	Medida 1	Medida 2	Valor medio	Desviación
	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C
1	35.0	36.0	36.0	36.0	36.0	37.3	37.3	37.3	0.0000
2	36.0	37.0	37.0	38.0	38.0	39.4	39.4	39.4	0.0000
3	43.0	45.0	45.0	47.0	48.0	49.5	49.5	49.5	0.0000
4	51.0	53.0	52.0	56.0	58.0	59.7	59.7	59.7	0.0000
5	58.0	61.0	59.0	64.0	67.0	69.8	69.8	69.8	0.0000
6	65.0	68.0	68.0	74.0	76.0	80.0	80.0	80.0	0.0000
7	73.0	75.0	76.0	83.0	86.0	90.2	90.2	90.2	0.0000
8	80.0	83.0	85.0	92.0	96.0	100.4	100.4	100.4	0.0000
9	87.0	91.0	90.0	101.0	105.0	110.4	110.4	110.4	0.0000

Tabla C2 – Coeficientes de ajustes

Grau	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆
	S2	S3	S4	S5	S6
1	1.3927	1.332	1.314	1.1269	1.061
	-10.962	-10.509	-9.2622	-3.2571	-1.171
2	0.0001	0.0002	0.0001	0.0001	0.0001
	0.9852	0.9784	0.9884	0.9884	0.9882
	-0.6692	-0.819	-0.2675	-0.1681	-0.2512
3	0.000001	0.000004	0.000004	2.00E-06	0.000004
	-0.000009	-0.0002	-0.0001	-0.0001	-0.0003
	0.99	0.9944	0.9957	0.9952	1.002
	-0.7114	-0.9613	-0.3304	-0.2257	-0.3699

Tabla C3 – Temperatura ajustada para cada polinomio

Polinomio de grado 1				Polinomio de grado 2						Polinomio de grado 3					
T ₃	T ₄	T ₅	T ₆	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆
S3	S4	S5	S6	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S1	S2	S3	S4	S5	S6
°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C
37.4	38.0	37.3	37.0	0.0	33.9	34.7	35.4	35.5	35.5	0.0	34.0	34.8	35.6	35.6	35.5
38.8	39.4	39.6	39.1	0.0	34.9	35.7	36.4	37.5	37.4	0.0	35.0	35.8	36.6	37.6	37.5
49.4	49.9	49.7	49.8	0.0	41.9	43.6	44.4	46.5	47.4	0.0	41.9	43.7	44.6	46.5	47.5
60.1	59.1	59.8	60.4	0.0	49.8	51.6	51.4	55.5	57.4	0.0	49.9	51.8	51.7	55.5	57.5
70.7	68.3	68.9	69.9	0.0	56.8	59.6	58.4	63.5	66.4	0.0	56.9	59.9	58.9	63.6	66.6
80.1	80.1	80.1	79.5	0.0	63.8	66.6	67.4	73.5	75.4	0.0	63.9	67.0	68.2	73.7	75.8
89.4	90.6	90.3	90.1	0.0	71.8	73.7	75.4	82.6	85.5	0.0	71.9	74.2	76.5	82.8	86.1
100.0	102.4	100.4	100.7	0.0	78.8	81.8	84.5	91.6	95.5	0.0	78.9	82.5	86.0	92.0	96.6
110.7	109.0	110.6	110.2	0.0	85.8	89.9	89.5	100.7	104.6	0.0	86.0	90.9	91.4	101.3	106.2

Tabla C4 – Error medio cuadrático para cada polinomio de ajuste

Polinomio de grado 1				Polinomio de grado 2						Polinomio de grado 3					
E ₃	E ₄	E ₅	E ₆	E ₁	E ₂	E ₃	E ₄	E ₅	E ₆	E ₁	E ₂	E ₃	E ₄	E ₅	E ₆
S3	S4	S5	S6	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S1	S2	S3	S4	S5	S6
(°C) ²	(°C) ²	(°C) ²	(°C) ²	(°C) ²	(°C) ²	(°C) ²	(°C) ²	(°C) ²	(°C) ²	(°C) ²	(°C) ²	(°C) ²	(°C) ²	(°C) ²	(°C) ²
0.0204	0.5503	0.0001	0.0756		11.3212	6.9559	3.4429	3.0839	3.4092		11.0859	6.4286	2.9866	3.0095	3.2403

0.3906	0.0020	0.0273	0.0640	20.0024	14.0205	8.7604	3.4764	3.8228	19.6817	13.2473	7.9738	3.3957	3.6390
0.0048	0.1353	0.0429	0.0660	58.0751	34.6450	25.8776	8.9545	4.3564	57.4342	33.1062	23.6381	8.7886	4.0914
0.1498	0.4022	0.0223	0.4449	97.2965	65.6424	68.8950	17.6745	5.2863	96.2784	62.7960	63.3929	17.2796	4.7640
0.8892	2.3599	0.8752	0.0135	168.7713	103.8850	130.0467	39.7013	11.5118	167.0961	98.7872	119.0430	38.6662	10.1095
0.0045	0.0081	0.0178	0.2862	262.7220	178.5698	158.6063	41.9761	20.8886	260.0092	169.2386	139.8891	39.9178	17.5963
0.6545	0.1614	0.0057	0.0156	339.1748	272.7122	218.1972	58.4002	22.3389	334.9026	256.6020	187.1122	54.3084	16.5851
0.1246	4.1120	0.0003	0.0812	467.1304	347.2260	253.7968	77.2448	23.6429	460.4028	321.0100	206.2642	69.8282	14.4686
0.0918	1.9662	0.0255	0.0276	605.1551	421.4152	436.8727	94.4706	33.4975	594.9218	380.7500	361.4333	82.2649	17.9513

Tabla C5 – Temperatura ajustada y error sistemático

Temperatura Ajustada					Error sistemático					
T ₃	T ₄	T ₅	T ₆	Patrón	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆
S3	S4	S5	S6	Valor medio	S1	S2	S3	S4	S5	S6
°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C
37.4	38.0	37.3	37.0	37.3	0.48	0.14	0.74	0.01	-0.27	
38.8	39.4	39.6	39.1	39.4	-0.22	-0.62	-0.04	0.17	-0.25	
49.4	49.9	49.7	49.8	49.5	-0.58	-0.07	0.37	0.21	0.26	
60.1	59.1	59.8	60.4	59.7	0.37	0.39	-0.63	0.15	0.67	
70.7	68.3	68.9	69.9	69.8	0.01	0.94	-1.54	-0.94	0.12	
80.1	80.1	80.1	79.5	80.0	-0.44	0.07	0.09	0.13	-0.54	
89.4	90.6	90.3	90.1	90.2	0.51	-0.81	0.40	0.08	-0.13	
100.0	102.4	100.4	100.7	100.4	0.05	-0.35	2.03	0.02	0.28	
110.7	109.0	110.6	110.2	110.4	-0.20	0.30	-1.40	0.16	-0.17	

Tabla C6 – Resultado final del análisis de incertidumbre

Análisis de Incertidumbre																
Resolución del Instrumento				Inc. del patrón	Incertidumbre de Ajuste						Incertidumbre Expandida					
T ₃	T ₄	T ₅	T ₆	U _p (k=2)	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆
S3	S4	S5	S6		S1	S2	S3	S4	S5	S6	S1	S2	S3	S4	S5	S6
°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C
0.5774	0.5774	0.5774	0.5774	0.0	0.4203	0.5770	1.1770	0.3812	0.3918	1.52	1.79	3.01	1.46	1.48		

