



**Instrumentación y evaluación  
termo-mecánica de un motor de  
combustión interna monocilíndrico  
para fines investigativos**

**Bayron Elias Viloría Sierra**

**Danilo Andres Melo Leal**

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

2022

# **Instrumentación y evaluación termo-mecánica de un motor de combustión interna monocilíndrico para fines investigativos**

**Bayron Elias Viloría Sierra**

**Danilo Andres Melo Leal**

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

2022

*Este TIG se lo dedicamos, principalmente a Dios por ser nuestra guía en todo el proceso. Se lo dedicamos a nuestras familias que han sido un apoyo fundamental en todos estos años de estudio y experiencia. Finalmente, se lo dedicamos a todas las personas que de una u otra forma aportaron un granito de arena para que este proyecto se materializara como una realidad.*

*Los autores.*

## **Agradecimientos**

En primer lugar, le agradecemos Dios por ser nuestra guía y de quien proviene todas las cosas. Le agradecemos de forma muy especial a la Universidad Antonio Nariño por ser nuestra Alma Mater y darnos la oportunidad de formarnos como profesionales. A todo el cuerpo docente y administrativo de la UAN-Sede Puerto Colombia que tanto nos han apoyado en nuestros años de estudios.

De forma especial le agradecemos, también, a nuestro tutor técnico, el Ing. José Daniel Hernández por ser nuestra guía en todo el desarrollo experimental del proyecto de grado. También, al Ing. Camilo Fontalvo, nuestro asesor metodológico, por su tiempo, gentileza y paciencia en la revisión del documento.

Finalmente, queremos agradecerles a todos nuestros compañeros de la UAN con quienes compartimos experiencias maravillosas y momentos de grandes aprendizajes.

A todos, muchas gracias.

*Los autores*

## **Resumen**

Este TIG se encuentra enmarcado dentro de un proyecto de investigación aprobado por la Vicerrectoría de Ciencia, Tecnología e Innovación de la Universidad Antonio Nariño. El proyecto No 2022008 titulado: “Desarrollo de técnicas estadísticas para el análisis de incertidumbre y desempeño metrológico en equipos industriales” busca evaluar la confiabilidad metrológica de equipos industriales. En ese sentido, este TIG tiene como objetivo principal implementar un sistema de control de RPM, así como evaluar desde el punto de vista termo-mecánico las variables que impactan en la eficiencia térmica del motor de combustión interna en la UAN-Sede Puerto Colombia. La motivación principal para este estudio nace de la problemática identificada en la operación del motor de combustión de la UAN, el cual requiere conocer los parámetros de desempeño a partir del uso de diversos tipos de combustibles. Los resultados consolidados en la investigación confirman que es posible obtener una alta eficiencia térmica en el motor de combustión interna cerca 89% considerando procesos reversibles. Además, el consumo específico de combustible es mayor cuando el motor funciona a 2000 RPM siendo igual a 2.39 g lo que equivale a 3,47 ml.

**Palabras clave:** Ciclo Otto, Curva de eficiencia térmica, Ingeniería Mecánica, Motor de combustión interna.

## **Abstract**

This TIG is part of a research project approved by the Vice President for Science, Technology and Innovation of the Antonio Nariño University. Project No 2022008 entitled: "Development of statistical techniques for the analysis of uncertainty and metrological performance in industrial equipment" seeks to evaluate the metrological reliability of industrial equipment. In that sense, this TIG has as its main objective to implement an RPM control system, as well as to evaluate from the thermo-mechanical point of view the variables that impact the thermal efficiency of the internal combustion engine at the UAN-Puerto Colombia Headquarters. The main motivation for this study arises from the problems identified in the operation of the UAN combustion engine, which requires knowing the performance parameters from the use of various types of fuels. The consolidated results in the research confirm that it is possible to obtain a high thermal efficiency in the internal combustion engine close to 89% considering reversible processes. In addition, the specific fuel consumption is higher when the engine runs at 2000 RPM being equal to 2.39 g which is equivalent to 3.47 ml.

**Keywords:** Otto cycle, Thermal efficiency curve, Mechanical engineering, Internal combustion engine.

# Contenido

<b>1. Introducción .....</b>	<b>10</b>
1.1 Formulación del problema.....	10
1.2 Objetivos.....	11
1.2.1 Objetivo general.....	11
1.2.2 Objetivos específicos.....	11
1.3 Justificación .....	11
<b>2. Fundamentos de la confiabilidad metrológica en un motor de combustión.....</b>	<b>12</b>
2.1 Análisis de incertidumbre para los procesos de transferencia de calor en el motor de combustión interna.....	12
2.2 Incertidumbre de medición asociada a <i>Q<sub>real</sub></i> .....	15
2.3 Ciclo Otto y cálculo del rendimiento térmico.....	17
<b>3. Metodología experimental .....</b>	<b>19</b>
<b>4. Resultados y discusión .....</b>	<b>23</b>
4.1 Curva de rendimiento del consumo específico de combustible a partir de distintos valores de RPM.....	23
4.1.1 Análisis del consumo específico de combustible.....	24
4.1.2 Análisis del proceso de transferencia de calor en el motor .....	26
4.1.3 Cálculo de la eficiencia térmica del motor de combustión.....	28
4.2 Guías de laboratorios para ser implementadas en el curso de máquinas térmicas .....	30
<b>5. Conclusiones y recomendaciones .....</b>	<b>31</b>
<b>Bibliografía.....</b>	<b>33</b>
<b>Anexo A: Calibración de los sensores de temperatura .....</b>	<b>35</b>
<b>Anexo B: Calibración de la balanza digital Trumax.....</b>	<b>41</b>
<b>Anexo C: Guía de Laboratorio del Motor de Combustión Interna .....</b>	<b>46</b>

## Lista de figuras

Figura 1. Visualización de las principales fuentes de incertidumbre (Diagrama de Ishikawa).....	15
Figura 2 – Diagrama P-V asociada al un ciclo termodinámico Otto.....	17
Figura 3 – Motor de Combustión Interna de la UAN-Sede Puerto Colombia .....	19
Figura 4 – Partes del Motor de Combustión Interna.....	20
Figura 5 – Panel de Control del Motor de Combustión Interna .....	20
Figura 6 – Curva del consumo específico de combustible del motor de combustión .....	25
Figura 7 – Curva del consumo volumetrico de combustible del motor de combustión .....	26
Figura 8 – Calor de entrada al proceso ( $Q_{in}$ ) y calor perdido en el proceso ( $Q_{out}$ )4 .....	27
Figura 9 – Diferencia del calor de entrada y calor de salida del sistema.....	28
Figura 10 – Eficiencia térmica y ecuación de rendimiento .....	29
Figura 11 – polinomio grado 1,2,3 sensor 2 (S2) .....	37
Figura 12 - polinomio grado 1,2,3 sensor 3 (S3) .....	37
Figura 13 – polinomio grado 1,2,3 sensor 4 (S4) .....	38
Figura 14 – polinomio grado 1,2,3 sensor 5 (S5) .....	38
Figura 15 – polinomio grado 1,2,3 sensor 6 (S6). .....	38
Figura 16 – Curva de calibración balanza (polinomio de grado 1).....	43
Figura 17 – Curva de calibración balanza (polinomio de grado 2).....	44
Figura 18 – Curva de calibración balanza (polinomio de grado 3).....	44

## **Lista de tablas**

Tabla 1 – Características técnicas del motor .....	20
Tabla 2 – Datos experimentales .....	24
Tabla 3 – Consumo específico y volumétrico de combustible .....	25
Tabla 4 – Cálculo de los valores asociados al calor de entrada y salida del sistema .....	27
Tabla 5 – Tabla de datos experimentales .....	36
Tabla 6 – error sistemático (no ajustado) .....	37
Tabla 7 – coeficientes de los polinomios interpoladores .....	38
Tabla 8 – Temperatura ajustada.....	39
Tabla 9 – Incertidumbre de ajuste .....	39
Tabla 10 – Factor de cobertura .....	39
Tabla 11 – Resultado de la calibración .....	40
Tabla 12 – análisis de la incertidumbre. ....	40
Tabla 13 – Calibración balanza (carga ascendente).....	42
Tabla 14 – Calibración balanza (carga descendente).....	43
Tabla 15 – Resultado final de la calibración de la balaza.....	45

# 1. Introducción

El motor en si mismo tiene sus orígenes hace muchos años y muchos de las piezas que constituían los motores de antaño eran consideradas imposibles de ser reparadas y o cambiadas, así, eran completamente imprescindibles para su funcionamiento [1-3]. Los motores de combustión interna son considerados máquinas térmicas capaces de transformar la energía química de un combustible en energía mecánica con el objetivo de producir trabajo, sin embargo, por la segunda ley de la termodinámica no todo ese trabajo puede ser aprovechado en su totalidad, puesto que necesariamente un porcentaje debe ser cedido al ambiente en forma de calor [4-6].

En particular, el motor de combustión interna del laboratorio de ingeniería térmica y termofluidos, fue desarrollado en otro trabajo [7] y ha generado diversos productos científicos en revistas especializadas [8-11]. En ese TIG se busca repotenciar el motor implementando un sistema de medición RPM y consumo específico de combustible con el fin de obtener una alta confiabilidad metrológica en los procesos académicos e investigativos desarrollados en el motor de combustión para toda la comunidad académica de la UAN-Sede Puerto Colombia.

## 1.1 Formulación del problema

Actualmente el Laboratorio de Ingeniería Térmica y Termofluidos de la UAN en su sede de Puerto Colombia cuenta con un motor de combustión interna monocilíndrico que, si bien se ha podido avanzar en su recuperación, aún tiene muchas carencias que se resolver. Una de ellas radicaba en la imposibilidad de medir con buena precisión las revoluciones del motor para, posteriormente, medir el consumo específico de combustible con alta confiabilidad metrológica. Además,

la confiabilidad metrológica de toda la instrumentación asociada para la medición de masa y temperatura no era óptima. Esta problemática fue abordada en el presente TIG y, en consecuencia, se definió la pregunta problema: ¿Cuál es la confiabilidad metrológica de la instrumentación asociada al motor de combustión interna en el Laboratorio de Ingeniería Térmica y Termofluidos de la UAN Sede Puerto Colombia?

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo general**

Realizar la instrumentación y evaluación termo-mecánica de un motor de combustión interna monocilíndrico para fines investigativos.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

- Implementar un sistema de control y medición de RPM que permita el ajuste manual de la velocidad de rotación del motor.
- Cuantificar y definir la curva de rendimiento del consumo específico de combustible a partir de distintos valores de RPM.
- Realizar las guías de laboratorios para ser implementadas en el desarrollo del curso de máquinas térmicas la UAN-Sede Puerto Colombia.

## **1.3 Justificación**

Este proyecto de grado basa su justificación en la importancia de conocer con exactitud los parámetros térmicos y mecánicos que impactan en un motor de combustión interna. Además, de conocer el consumo específico de combustible con alta confiabilidad metrológica y, así mismo, conocer la confiabilidad de los instrumentos para la medición de temperatura. Todo lo anterior con el principal propósito de atender a la comunidad estudiantil y contribuir con una guía de experiencia de laboratorio para los estudiantes del programa de ingeniería mecánica de la sede Puerto Colombia.

## 2. Fundamentos de la confiabilidad metrológica en un motor de combustión

Fundamentado en los conceptos clásicos de transferencia de calor en un motor de combustión interna y el análisis de incertidumbre definido en las directrices de la ISO GUM (2008), esta sección describe la fundamentación teórica que sustenta el proyecto de investigación. Adicionalmente, muestra la formulación de un algoritmo matemático para el análisis de incertidumbre de medición el cual ha sido realizado los investigadores de la presente propuesta.

### 2.1 Analisis de incertidumbre para los procesos de trabsferencia de calor en el motor de combustión interna

Considerando los fundamentos clásicos de la transferencia de calor, la cantidad total de energía térmica transferida por unidad de tiempo entre los fluidos de trabajo de un motor de combustión interna se puede describir mediante la ecuación (1):

$$\dot{Q} = \dot{m} C_p \Delta T (T_{w,out} - T_{w,in}) \quad (1)$$

Alternativamente, la tasa de transferencia de calor puede calcularse mediante la Ecuación (2), en función del Coeficiente de transferencia de calor  $U$  general, el área de transferencia de calor  $A_s$  y la temperatura media logarítmica  $\Delta T_{ml}$ .

$$\dot{Q} = UA_s \Delta T_{ml} \quad (2)$$

En su trabajo pionero desarrollado en 1955, London & Kays (1955) propusieron un método alternativo para evaluar el rendimiento de los intercambiadores de calor —*el método de la eficacia de la NTU*—, evitando así la necesidad de un conocimiento previo del Coeficiente Global de Transferencia de Calor  $U$ , cuya determinación requiere procedimientos experimentales complejos asociados intrínsecamente con altos niveles de incertidumbres.

Siguiendo el enfoque de London & Kays, la efectividad de un intercambiador de calor que funciona con dos fluidos de trabajo (por ejemplo, agua y aire) se puede calcular por la relación entre la cantidad real de calor intercambiado entre los fluidos de trabajo del motor de combustión interna y la cantidad máxima de calor que podrían intercambiarse limitados por las condiciones termodinámicas que gobiernan el proceso de transferencia de calor, expresadas por la Ecuación 3:

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}_{real}}{\dot{Q}_{max}} \quad (3)$$

Como se definió anteriormente, de hecho, la efectividad refleja un concepto térmico, ya que la ec. (3) se puede reescribir en función de la capacidad térmica de los fluidos de trabajo y las temperaturas extremas, entrada y salida, de estos fluidos en el motor. Por conveniencia numérica, el denominador de la ecuación 3, que refleja un valor teórico (i.e.:  $\dot{Q}_{max}$ ), se ampliará, mientras que la cantidad real de calor intercambiado  $\dot{Q}_{real}$ , se conservará como un solo término, para preservar su integridad durante la primera etapa de la propagación de incertidumbre. Siguiendo esta línea de pensamiento,  $\dot{Q}_{max}$  puede ser escrito por la Ecuación (4), como sigue:

$$\dot{Q}_{max} = C_{min} (T_{h,in} - T_{c,in}) \quad (4)$$

Sustituyendo la ecuación (4) en (3), se obtiene la ecuación 5:

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}_{real}}{C_{mín} (T_{a,in} - T_{w,in})} \quad (5)$$

La incertidumbre expandida asociada con el cálculo de la efectividad del intercambiador se puede estimar a partir de la siguiente expresión:

$$U\varepsilon^2 = \left( \frac{\partial\varepsilon}{\partial\dot{Q}_{real}} U\dot{Q}_{real} \right)^2 + \left( \frac{\partial\varepsilon}{\partial C_{mín}} UC_{mín} \right)^2 + \left( \frac{\partial\varepsilon}{\partial T_{a,in}} UT_{a,in} \right)^2 + \left( \frac{\partial\varepsilon}{\partial T_{w,in}} UT_{w,in} \right)^2 \quad (6)$$

De acuerdo con la Guía para la expresión de la Incertidumbre de Medición (ISO GUM 2008), es necesario estimar los coeficientes de sensibilidad y los componentes de incertidumbre asociados con cada variable impactante. Los coeficientes de sensibilidad se pueden obtener a partir de las siguientes expresiones:

$$\frac{\partial\varepsilon}{\partial\dot{Q}_{real}} = \frac{1}{C_{mín} (T_{a,in} - T_{w,in})} \quad (7)$$

$$\frac{\partial\varepsilon}{\partial C_{mín}} = -\frac{\dot{Q}_{real}}{C_{mín}^2 (T_{a,in} - T_{w,in})} \quad (8)$$

$$\frac{\partial\varepsilon}{\partial T_{a,in}} = -\frac{\dot{Q}_{real}}{C_{mín} (T_{a,in} - T_{w,in})^2} \quad (9)$$

$$\frac{\partial\varepsilon}{\partial T_{w,in}} = \frac{\dot{Q}_{real}}{C_{mín} (T_{a,in} - T_{w,in})^2} \quad (10)$$

La principal fuente de incertidumbre que afecta la evaluación de la efectividad del motor se puede visualizar, convenientemente, por medio del clásico Diagrama de Causa-Efecto Ishikawa (1990), que se muestra en la Figura 1.

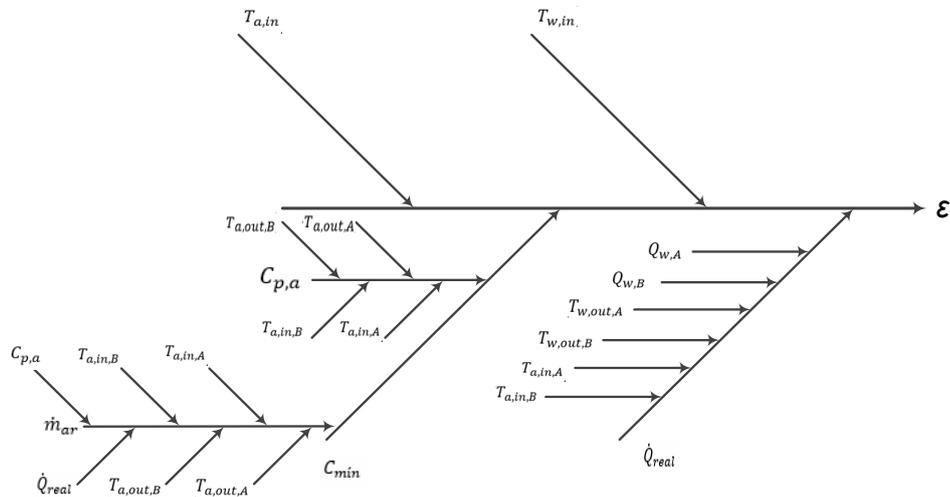


Figura 1. Visualización de las principales fuentes de incertidumbre (Diagrama de Ishikawa)

## 2.2 Incertidumbre de medición asociada a

$$\dot{Q}_{real}$$

Las ecuaciones (7-9) expresan los coeficientes de sensibilidad en función de  $\dot{Q}_{real}$ , que también se pueden expandir de acuerdo con la ecuación (11):

$$\dot{Q}_{real} = \dot{m}_w c_{p,w} (T_{w,out} - T_{w,in}) \quad (11)$$

En esta ecuación,  $\dot{m}_w$  se puede calcular a partir de la densidad ( $\rho_w$ ) y el flujo volumétrico ( $Q_w$ ), como se indica en la ecuación (12):

$$\dot{m}_w = Q_w \rho_w \quad (12)$$

Combinando las ecuaciones (12) y (11), se obtiene la ecuación (13):

$$\dot{Q}_{real} = Q_w \rho_w C_{p,w} (T_{w,out,B} - T_{w,in}) \quad (13)$$

La densidad del agua se calcula a partir de los coeficientes de Tanaka (2001), dados por la Ecuación (14):

$$\rho_w = a_5 \left( 1 - \frac{(a_1 + T_{av})^2 (a_2 + T_{av}^2)}{a_3 (a_4 + T_w^2)} \right) \quad (14)$$

Al manipular estas ecuaciones y coeficientes, se puede escribir una ecuación más práctica para expresar  $\dot{Q}_{real}$  en términos de parámetros convenientes.

$$\dot{Q}_{real} = Q_w C_{p,w} (T_{w,out} - T_{w,in}) a_5 \left( 1 - \frac{(a_1 + T_{av})^2 (a_2 + T_{av}^2)}{a_3 (a_4 + T_{av}^2)} \right) \quad (15)$$

Donde,

$$T_{av} = \frac{(T_{w,out} + T_{w,in})}{2} \quad (16)$$

La incertidumbre asociada con  $\dot{Q}_{real}$  se puede evaluar a través de la Ecuación (17):

$$U\dot{Q}_{real}^2 = \left( \frac{\partial \dot{Q}_{real}}{\partial T_{w,out}} U T_{w,out} \right)^2 + \left( \frac{\partial \dot{Q}_{real}}{\partial T_{w,in}} U T_{w,in} \right)^2 + \left( \frac{\partial \dot{Q}_{real}}{\partial Q_w} U Q_w \right)^2 \quad (17)$$

Aplicando el criterio de expansión de incertidumbre de medición en serie de Taylor, los coeficientes de sensibilidad se obtienen mediante las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \dot{Q}_{real}}{\partial T_{w,out}} = & \left( 1 - \frac{(a_1 + T_{av})^2 (a_2 + T_{av}^2)}{a_3 (a_4 + T_{av}^2)} \right) + \\ & + \left( \frac{T_{av} (a_1 + T_{av}) (a_2 + T_{av}^2) - ((a_1 + T_{av}) (a_2 + T_{av}^2) + T_{av} (a_1 + T_{av})^2) (a_4 + T_{av}^2)}{a_3 (a_4 + T_{av}^2)} \right) ( \\ & - T_{w,in} ) \end{aligned} \quad (18)$$

$$\frac{\partial \dot{Q}_{real}}{\partial T_{w,out}} = \left( \frac{T_{av}(a_1 + T_{av})(a_2 + T_{av}^2) - ((a_1 + T_{av})(a_2 + T_{av}^2) + T_{av}(a_1 + T_{av})^2)(a_4 + T_{av}^2)}{a_3(a_4 + T_{av}^2)} \right) (19)$$

$$- T_{w,in} - \left( 1 - \frac{(a_1 + T_{av})^2(a_2 + T_{av}^2)}{a_3(a_4 + T_{av}^2)} \right)$$

$$\frac{\partial \dot{Q}_{real}}{\partial Q_w} = C_{p,w} (T_{w,out} - T_{w,in}) a_5 \left( 1 - \frac{(a_1 + T_{av})^2(a_2 + T_{av}^2)}{a_3(a_4 + T_{av}^2)} \right) (20)$$

## 2.3 Ciclo Otto y cálculo del rendimiento térmico

El ciclo Otto mostrado en un diagrama P-V, cuenta básicamente con cuatro procesos o, también llamado, cuatro tiempos: admisión, compresión, expansión y escape. La Figura 2 representa el diagrama PV de un ciclo Otto:

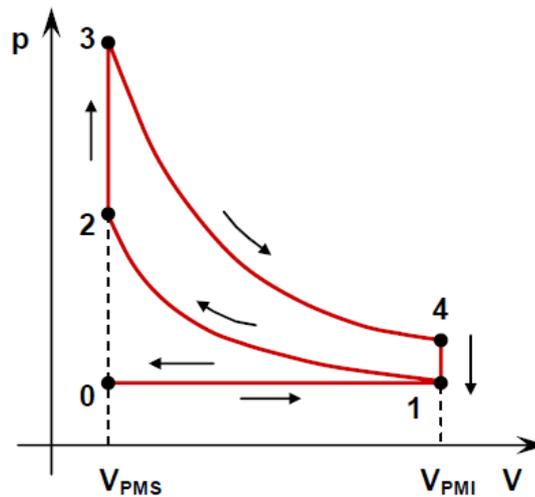


Figura 2 – Diagrama P-V asociada al un ciclo termodinámico Otto

El calor de entrada al ciclo, es decir, el proceso 2-3 puede ser calculado conforme la Ecuación (21):

$$Q_{in} = C_v \cdot (T_3 - T_2) (21)$$

Ya para el calor de salida 4-1, es decir, el proceso de escape se utiliza la de forma isocórica. Ecuación (22):

$$Q_{out} = C_v \cdot (T_4 - T_1) \quad (22)$$

Combinando ambas ecuaciones la eficiencia térmica es dada por la Ecuación (23):

$$\eta_t = \frac{Q_{in} - Q_{out}}{Q_{in}} = \frac{C_v \cdot (T_3 - T_2) - C_v \cdot (T_4 - T_1)}{C_v \cdot (T_3 - T_2)} \quad (23)$$

Algunas relaciones termodinámicas pueden ser encontradas y son definidas por las siguientes expresiones:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma-1} \quad (24)$$

$$\frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{V_4}{V_3}\right)^{\gamma-1} \quad (25)$$

Considerando que  $V_1 = V_4$  y  $V_2 = V_3$ , como consecuencia de ello se define:

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{T_3}{T_4} \gg \frac{T_4}{T_1} = \frac{T_3}{T_2} \quad (26)$$

De esa forma, el rendimiento térmico también puede ser calculado por:

$$\eta_t = 1 - \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{\gamma-1} \quad (27)$$

La siguiente expresión define la relación de compresión en función de los volúmenes:

$$r_c = \frac{V_1}{V_2} \quad (28)$$

Finalmente, la siguiente expresión muestra el cálculo de la eficiencia térmica en función de la relación de compresión:

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{(r_c)^{\gamma-1}} \quad (29)$$

### **3. Metodología experimental**

El Laboratorio de Ingeniería Térmica y Termofluidos de la Universidad Antonio Nariño posee un motor de combustión de interna Yamaha EF2600D (Figura 3), el cual es objeto de estudio en este TIG. La Tabla 1 presenta las características técnicas del motor y del generador.



**Figura 3** – Motor de Combustión Interna de la UAN-Sede Puerto Colombia

Fuente: Autoría propia

Tabla 1 – Características técnicas del motor

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

La Figura 4 consolida las partes del motor:

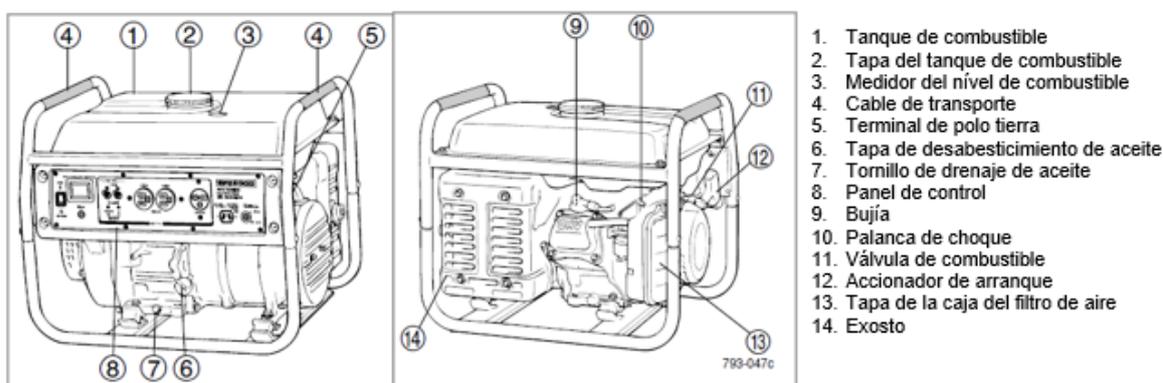


Figura 4 – Partes del Motor de Combustión Interna

Fuente: Manual YAMAHA EF2600D

Con relación al panel de control (parte 8), controla el sistema eléctrico del motor.

La Figura 5 presenta un plano de detalle, destacando siete partes de este sistema

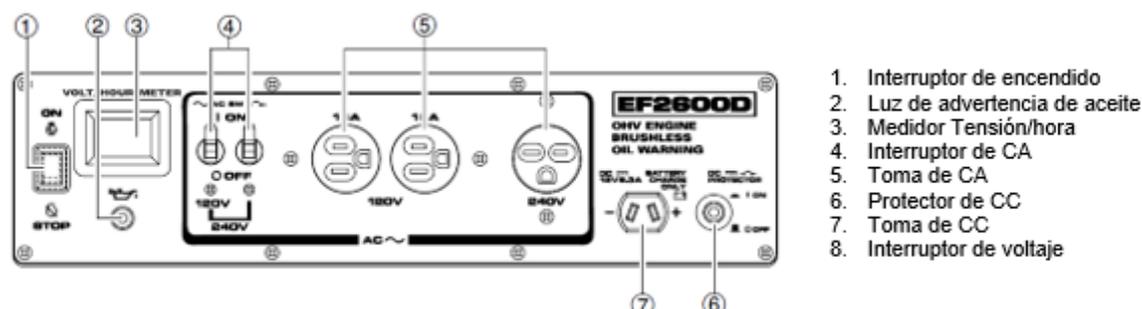


Figura 5 – Panel de Control del Motor de Combustión Interna

Fuente: Manual YAMAHA EF2600D

A seguir se describe la metodología experimental llevada a cabo para conseguir cada uno de los objetivos específicos originalmente formulados:

**Objetivo específico #1: Implementar un sistema de control y medición de RPM que permita el ajuste manual de la velocidad de rotación del motor.**

- **Etapa 1: Revisión, mantenimiento y puesta en marcha de los componentes mecánicos del motor**

En esta etapa se realizó una revisión e inspección de los componentes mecánicos del motor de combustión interna. Se realizó limpieza de sus partes y, particularmente, se realizó una revisión exhaustiva al carburador por ser una de las piezas más importante del motor de combustión.

- **Etapa 2: Calibración del sistema de medición de temperatura**

Esta etapa buscó realizar la calibración de los sensores de temperatura en conexional motor de combustión interna. Esto con el fin de conocer el polinomio interpolador que puede ser utilizado para corregir la temperatura de cada uno de los sensores. De esta manera se aumenta la confiabilidad metrológica de los procesos térmicos y, consecuentemente, de la eficiencia térmica asociada al motor de combustión interna. Para conseguir esta actividad se hizo uso de un bloque patrón, así como un termómetro patrón y la calibración de estos sensores fue realizada *in situ*, es decir, en el Laboratorio de Ingeniería Térmica y Termofluidos.

- **Etapa 3: Calibración del sistema gravimétrico para la medición del consumo específico de combustible**

En esta etapa se planteó realizar la calibración de la balanza digital Trumax utilizada para la medición del consumo específico de combustible. Para esto fue necesario el uso de masas patrón de clase F1 y E1, debidamente certificadas para tal fin. El procedimiento se llevó conforme a lo definido en la guía SIM publicada por el Sistema Interamericano de Metrología.

- ***Etapa 4: Implementación del sistema de encendido y control de las RPM***

En esta etapa se realizó la instalación de un sistema de encendido por medio de un switch en el motor. Adicionalmente, un sistema de control de las RPM será realizado e implementado.

***Objetivo específico #2: Cuantificar y definir la curva de rendimiento del consumo específico de combustible a partir de distintos valores de RPM.***

- ***Etapa 3: Evaluación de parámetros y curvas características de operación***

En esta etapa se procederá a determinar los parámetros asociados al motor de combustión interna. A seguir se citan algunos de los parámetros que serán determinados: cálculo de las presiones del sistema, RPM y eficiencia térmica. 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: Realizar las guías de laboratorios para ser implementadas en el desarrollo del curso de máquinas térmicas la UAN-Sede Puerto Colombia.***

- ***Etapa 4: Guías de laboratorio***

En esta última etapa del proyecto se espera realizar las guías de laboratorio de tal forma que el estudiante pueda realizar una práctica orientada y visualizar en la práctica los conocimientos teóricos.

## **4. Resultados y discusión**

Esta sección consolida el desarrollo de los objetivos específicos originalmente formulados, mostrando un análisis detallado y dando respuesta a la solución de estos. Las secciones subsecuentes describen el análisis de resultados y discusión de desarrollo del proyecto de grado.

### **4.1 Curva de rendimiento del consumo específico de combustible a partir de distintos valores de RPM**

En el curso de los experimentos realizados en el laboratorio de Ingeniería Térmica y Termofluidos se evaluaron, principalmente, 3 parámetros importantes que influyen en el proceso: consumo específico de combustible, análisis del proceso de transferencia de calor entre el calor de entrada y calor cedido, cálculo de la eficiencia térmica. La Tabla 2 consolida los resultados experimentales. Previo a este análisis se realizó la calibración de los sensores de temperatura y la balanza digital en conexión al motor de combustión. Los resultados están consolidados en el Anexo A y el Anexo B del presente documento.

**Tabla 2** – Datos experimentales

No	Tiempo (s)	RPM	Masa inicial, Mi (g)	Masa Final, Mf (g)	Mi - Mf (g)	Densidad Gasolina (g/l)	Volumen Consumido (ml)
1	70	2000	3897	3884	13	690	18.84
2	70	2000	3897	3888	9	690	13.04
3	70	2000	3888	3883	5	690	7.25
4	70	2000	3883	3867	16	690	23.19
5	70	2500	3867	3863	4	690	5.80
6	70	2500	3863	3858	5	690	7.25
7	70	2500	3858	3853	5	690	7.25
8	70	2500	3853	3844	9	690	13.04
9	70	3000	3844	3840	4	690	5.80
10	70	3000	3840	3833	7	690	10.14
11	70	3000	3833	3828	5	690	7.25
12	70	3000	3828	3819	9	690	13.04
13	70	3500	3819	3812	7	690	10.14
14	70	3500	3812	3807	5	690	7.25
15	70	3500	3807	3799	8	690	11.59
16	70	3500	3799	3789	10	690	14.49

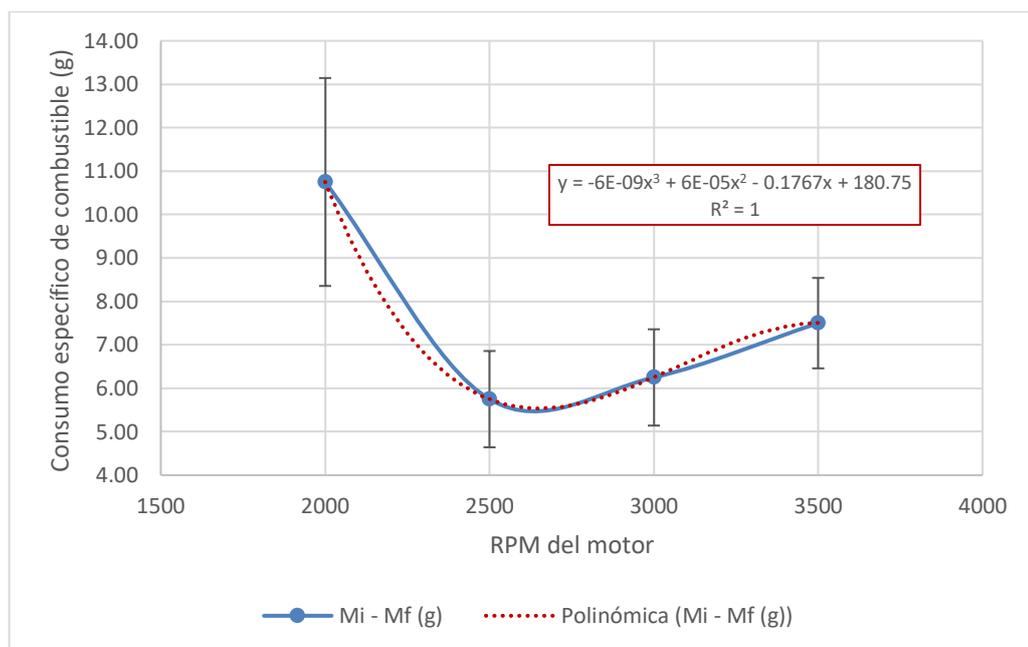
La tabla anterior muestra que se utilizó un tiempo de 70 segundos en cada punto experimental para evaluar el consumo de combustible. El valor de las RPM del motor fue variado desde 2000, 2500, 3000 y 3500. La masa inicial y la masa final fue medida utilizándose la balanza digital. La densidad de la gasolina es un valor de referencia estándar y, utilizándose el concepto de densidad, fue posible calcular el volumen consumido en mililitro. A seguir se realiza el análisis del consumo específico de combustible.

#### 4.1.1 Análisis del consumo específico de combustible

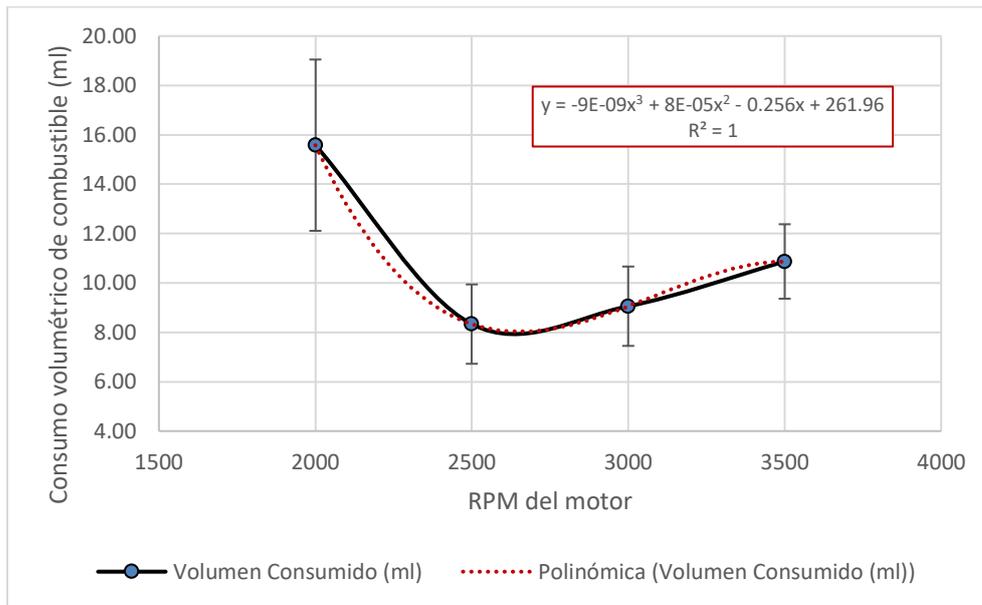
La siguiente tabla presenta los resultados del consumo específico de combustible. Así mismo las figuras 6 y 7 consolidan los resultados.

**Tabla 3** – Consumo específico y volumétrico de combustible

RPM	Mi - Mf (g) (promedio)	Mi - Mf (g) (Incertidumbre)	Volumen Consumido (ml) (promedio)	Volumen Consumido (ml) (Incertidumbre)
2000	10.75	2.39	15.58	3.47
2500	5.75	1.11	8.33	1.61
3000	6.25	1.11	9.06	1.61
3500	7.50	1.04	10.87	1.51



**Figura 6** – Curva del consumo específico de combustible del motor de combustión



**Figura 7** – Curva del consumo volumetrico de combustible del motor de combustión

Como ilustran las figuras arriba el mayor consumo de combustible se produce en 2000 revoluciones del motor de combustión interna. Posteriormente, el consumo de combustible empieza a disminuir hasta llegar a su mínimo consumo en aproximadamente 2500 RPM. Posteriormente, aumenta el consumo de combustible para las situaciones donde se oepra en 3000 RPM y 3500 RPM. El mayor consumo de combustible en 2000 RPM puede ser explicado debido a la inestabilidad del sistema a trabajar con bajas revoluciones. Vale la pena resaltar que, particularmente, el motor de combustión evaluado, al trabajar en las RPM mínimas, empieza a tener una cierta inestabilidad que puede producir, incluso, el apagado del sistema.

#### 4.1.2 Análisis del proceso de transferencia de calor en el motor

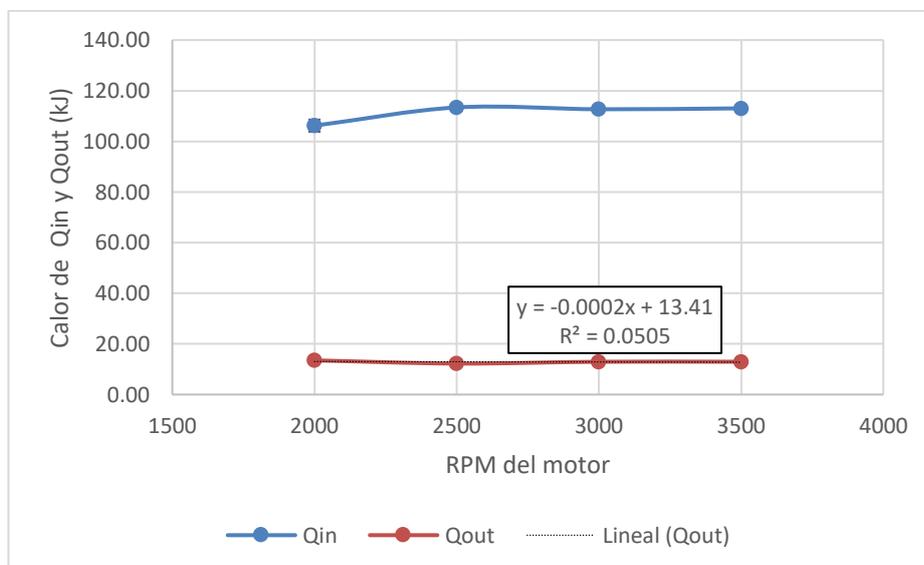
El análisis de transferencia de calor en el motor de combustión interna se asocia, principalmente, a los procesos de compresión-explosión (2-3) y expansión-escape (4-1). En este proceso se produce la entra de energía al sistema en forma de calor (2-3) y la salida de energía del sistema en forma de calor (4-1). Estos parámetros

son extramamente importantes, una vez que ellos dependen fuertemente el cálculo de la eficiencia térmica del motor. A su vez, el cálculo del calor de entrada y salida, así como su confiabilidad metrológica, depende directamente de la medición de temperatura. De ahí la importancia de calibrar los sensores de temperatura, tal cual como se desarrolló en este proyecto de grado y cuyos resultados están consolidados en el Anexo A. La Tabla 4 presenta el resultado del calor de entrada y salida del sistema asociado al motor de combustión interna.

**Tabla 4** – Cálculo de los valores asociados al calor de entrada y salida del sistema

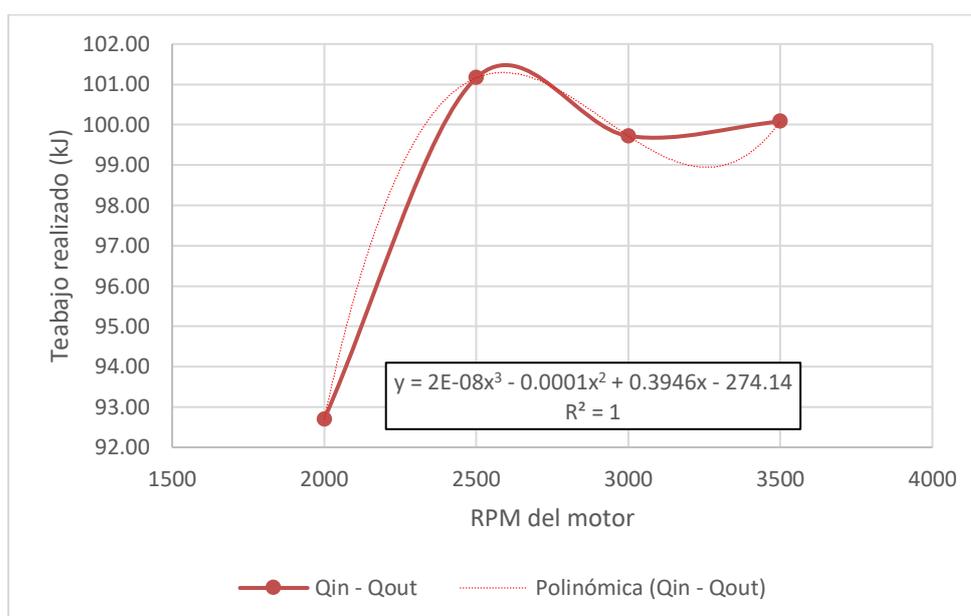
RPM	$Q_{in}$ (kJ)	$Q_{out}$ (kJ)
2000	106.20	13.50
2500	113.40	12.24
3000	112.68	12.96
3500	113.04	12.96

Los resultados consolidados confirmaron que el calor que entra al sistema, así como el calor que sale del sistema es prácticamente constante a medida que se aumentan las revoluciones del motor. Eso se puede confirmar en la Figura 8 que se ilustra a seguir.



**Figura 8** – Calor de entrada al proceso ( $Q_{in}$ ) y calor perdido en el proceso ( $Q_{out}$ )

Además, la figura anterior confirma que el calor de entrada, como era de esperarse, siempre es superior al calor de salida. Esto debido a que dentro de las temperaturas asociadas al calor de entrada está incluida la temperatura máxima del proceso que es aquella de la combustión, así como la temperatura al final de la compresión. Ya para el caso del calor de salida del sistema, las temperaturas asociadas corresponden a aquella medida al final del proceso de expansión y la temperatura en la admisión que, básicamente corresponde a la temperatura ambiente. Así, la Figura 9 presenta la diferencia del calor de entrada y salida del sistema, lo que confirma una mayor diferencia cerca de las 2500 RPM.



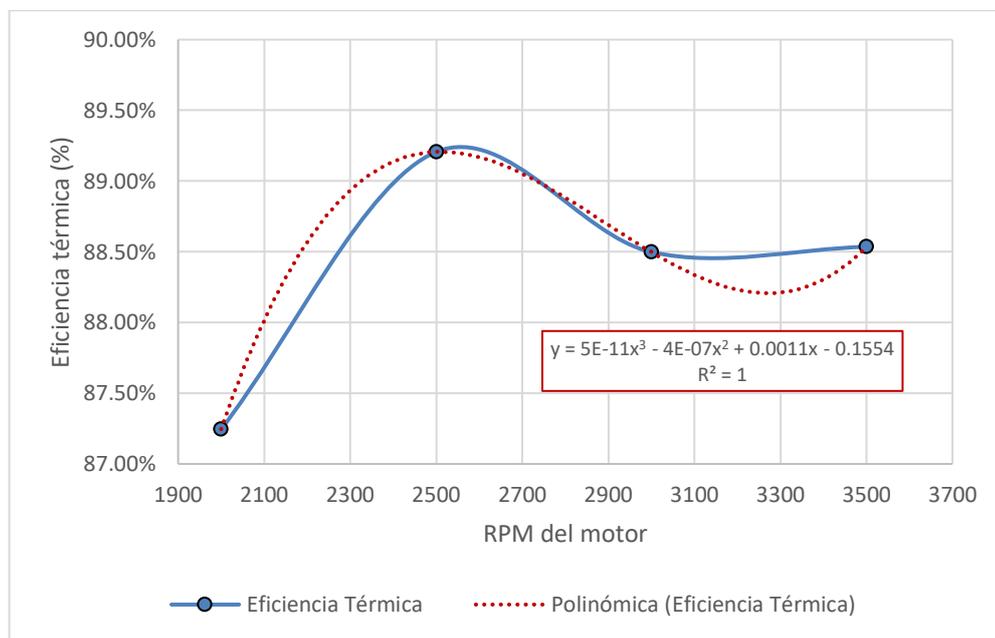
**Figura 9** – Diferencia del calor de entrada y calor de salida del sistema

### 4.1.3 Cálculo de la eficiencia térmica del motor de combustión

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 combutible 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 10** – Eficiencia térmica y ecuación de rendimiento

## **4.2 Guías de laboratorios para ser implementadas en el curso de máquinas térmicas**

Parte importante de los problemas de ingeniería se refieren a la transformación de la energía almacenada a flujos de trabajo y calor útiles, que a su vez puedan ser transformados posteriormente en energía almacenada nuevamente en otro tipo de acumulador, es en este aspecto donde surge la importancia de las máquinas térmicas, como son los motores de combustión interna. Estas experiencias de laboratorio introducen al estudiante en el conocimiento correspondiente a los aspectos generales de los motores de combustión interna y aplicación práctica en el funcionamiento de los numerosos componentes que trabajan en estrecha interdependencia en la generación de energía.

En este orden de idea y, manteniendo los principios termodinámicos asociados al ciclo Otto, además con la intención que la comunidad estudiantil y, principalmente, los estudiantes del Programa de Ingeniería Mecánica de la UAN-Sede Puerto Colombia, se desarrolló una guía de laboratorio que puede ser utilizada. Además, esta guía representa un instrumento importante para ser utilizado en los procesos de registro calificado que adelanta el programa ante el ministerio de Educación Nacional de Colombia. El Anexo C consolida los resultados de este tercer objetivo específico, es decir, muestra en detalle la guía de laboratorio realizada.

## **5. Conclusiones y recomendaciones**

Este trabajo de grado, la consolidación de los objetivos originalmente formulados, permitió obtener el objetivo general perseguido en la investigación: *Realizar la instrumentación y evaluación termo-mecánica de un motor de combustión interna monocilíndrico para fines investigativos.*

En relación al primer objetivo específico – *Implementar un sistema de control y medición de RPM que permita el ajuste manual de la velocidad de rotación del motor*– se instaló al sistema del motor de combustión interna un medidor de RPM analógico. Para la instalación se realizó una compleja instalación eléctrica que permitiera conectar el instrumento de medición y respondiera al aumento y disminución de las revoluciones aplicadas al motor. Este instrumento permite medir con alta confiabilidad las revoluciones a las cuales está operando el motor y, consecuentemente, evaluar el punto de RPM cuya eficiencia térmica es considerada la mayor en todo el proceso.

Considerando el segundo objetivo específico – *Cuantificar y definir la curva de rendimiento del consumo específico de combustible a partir de distintos valores de RPM*– se estableció la curva de rendimiento del motor de combustión tanto en gramos para el caso del consumo específico de combustible, como en mililitro para el caso del consumo volumétrico. Los resultados consolidados confirmaron que el consumo específico de combustible es mayor cuando el motor funciona a 2000 RPM siendo igual a 2.39 g lo que equivale a 3,47 ml.

Finalmente, en relación al tercer objetivo específico – *Realizar las guías de laboratorios para ser implementadas en el desarrollo del curso de máquinas térmicas la UAN-Sede Puerto Colombia*– se desarrolló una guía práctica de laboratorio a partir de toda la experiencia aprendida. Esa guía constituye un aporte significativo al Programa de Ingeniería Mecánica de la UAN en el marco del

proceso de renovación del registro calificado ante el Ministerio de Educación Nacional de Colombia. En la guía desarrollada se consolidan los principales aportes experimentales en el motor de combustión y será de gran utilidad para los futuros estudiantes que empiezan a tener sus primeras experiencias académica y científica en la operación de un motor de combustión interna.

A partir de la experiencia aprendida se realizan las siguientes recomendaciones:

- Realizar un mantenimiento preventivo al motor de combustión interna de forma periodica, principalmente, en la recarga de la batería del sistema de medición de RPM. Esto debido a que el motor no cuenta con una bobina de recarga que permita alimentar de energía eléctrica la batería durante la operación del motor.
- Evaluar la eficiencia térmica mediante el uso de otros combustibles y/o aditivos.

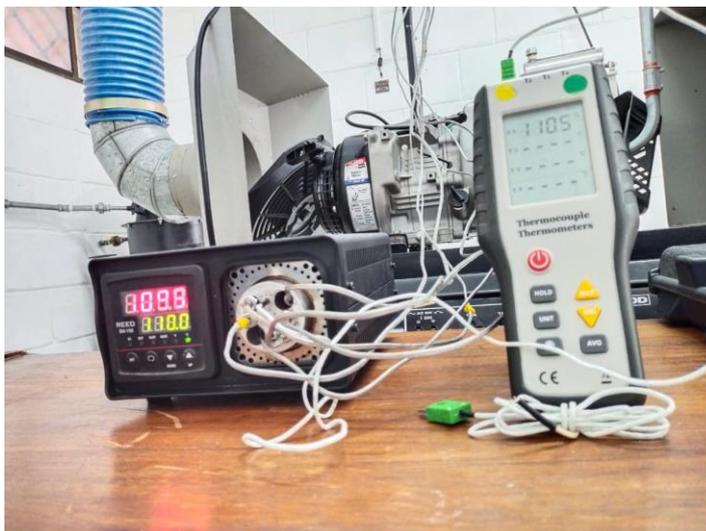
## **Bibliografía**

- [1] Pulkrabek, W. W. (2004). Engineering fundamentals of the internal combustion engine.
- [2] Watson, N., & Janota, M. (1982). Turbocharging the internal combustion engine. Macmillan International Higher Education..
- [3] Scheinert, H. (2006). U.S. Patent No. 7,021,058. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- [4] Mikalsen, R., & Roskilly, A. P. (2007). A review of free-piston engine history and applications. Applied Thermal Engineering, 27(14-15), 2339-2352.
- [5] Van Basshuysen, R., & Schäfer, F. (2004). Internal combustion engine handbook-basics, components, systems and perspectives (Vol. 345).
- [6] Muruganandam, M., & Kumar, P. M. (2020). Experimental analysis on internal combustion engine using MWCNT/water nanofluid as a coolant. Materials Today: Proceedings, 21, 248-252.
- [7] Duarte F. J. Generación Eléctrica A Partir De Gas De Síntesis En Las Zonas Inundables Del Sur Del Atlántico-Colombia. Proyecto de Investigación desarrollado dentro de la Convocatoria Interna de Proyectos CTI de la VCTI en la Universidad Antonio Nariño. 2014-2016.
- [8] Duarte, J., et al., Thermodynamic Analysis of Self-Ignition in Spark-Ignited Engines Operated with Alternative Gaseous Fuels, TECCIENCIA, Vol. 11 No. 20, 57-65, 2016, DOI: <http://dx.doi.org/10.18180/tecciencia.2016.20.8>.
- [9] Duarte, J., et al., Auto-Ignition Control in Spark-Ignition Engines Using Internal Model Control Structure, J. Energy Resour. Technol. Mar 2017, 139(2): 022201 (11 pages), DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4034026>

- [10] Duarte, J., Amador, G., Garcia, J., Fontalvo, A., Padilla, R. V., Sanjuan, M., & Quiroga, A. G. (2014). Auto-ignition control in turbocharged internal combustion engines operating with gaseous fuels. *Energy*, 71, 137-147.
- [11] Forero, J. D., Diaz, G. A., Garcia, J., Rincon, A., Fontalvo, A., Bula, A., & Padilla, R. V. (2017). Maximum power from fluid flow by applying the first and second laws of thermodynamics. *Journal of Energy Resources Technology*, 139(3).

## Anexo A: Calibración de los sensores de temperatura

Fotos de la calibración:





A seguir se presenta la tabla de datos:

**Tabla 5** – Tabla de datos experimentales

No Puntos	S1	S2	S3	S4	S5	S6	Temperatura del Patrón de Medición			
	Temperaturas indicadas por los sensores						Medida 1	Medida 2	Valor medio	Desviación
	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>5</sub>	T <sub>6</sub>	Medida 1	Medida 2	Valor medio	Desviación
	°C	°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

A seguir se presenta la tabla del cálculo del error sistemático sin ajustar los datos:

**Tabla 6 – error sistemático (no ajustado)**

Error sistemático (No Ajustado)					
T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>5</sub>	T <sub>6</sub>
S1	S2	S3	S4	S5	S6
E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>	E <sub>3</sub>	E <sub>4</sub>	E <sub>5</sub>	E <sub>6</sub>
°C	°C	°C	°C	°C	°C
0	-2,3	-1,3	-1,3	-1,3	-1,3
0	-3,4	-2,4	-2,4	-1,4	-1,4
0	-6,5	-4,5	-4,5	-2,5	-1,5
0	-8,7	-6,7	-7,7	-3,7	-1,7
0	-11,8	-8,8	-10,8	-5,8	-2,8
0	-15,0	-12,0	-12,0	-6,0	-4,0
0	-17,2	-15,2	-14,2	-7,2	-4,2
0	-20,4	-17,4	-15,4	-8,4	-4,4
0	-23,4	-19,4	-20,4	-9,4	-5,4

A seguir se presentan los distintos polinomios evaluados:

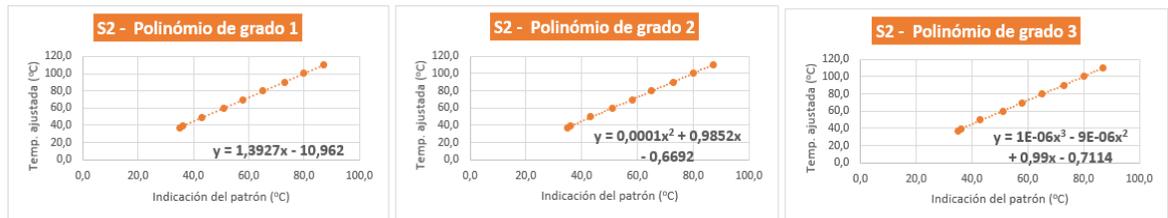


Figura 11 – polinomio grado 1,2,3 sensor 2 (S2)

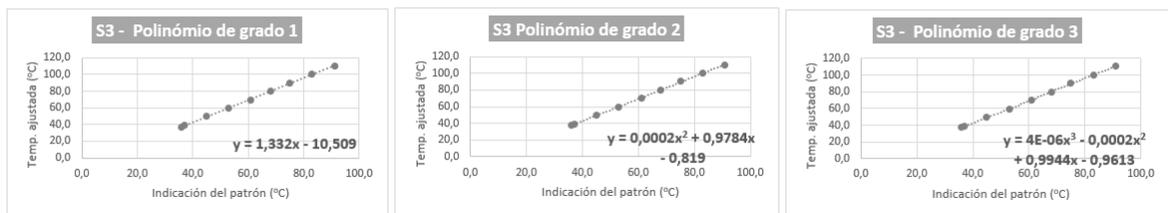


Figura 12 - polinomio grado 1,2,3 sensor 3 (S3)

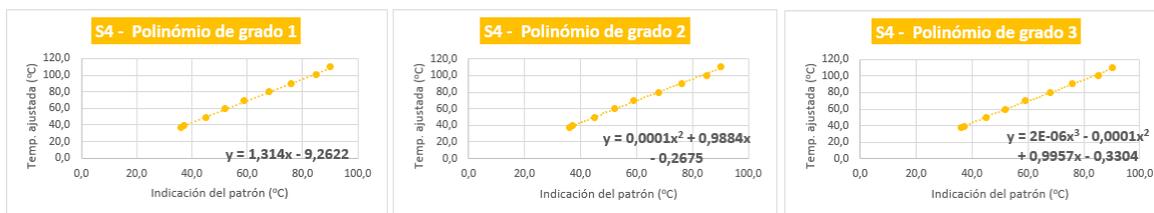


Figura 13 – polinomio grado 1,2,3 sensor 4 (S4)

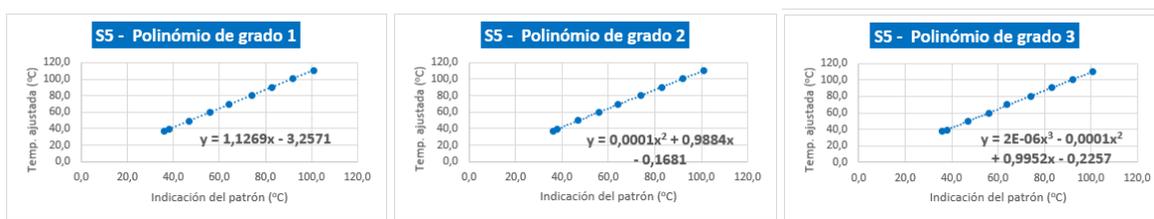


Figura 14 – polinomio grado 1,2,3 sensor 5 (S5)

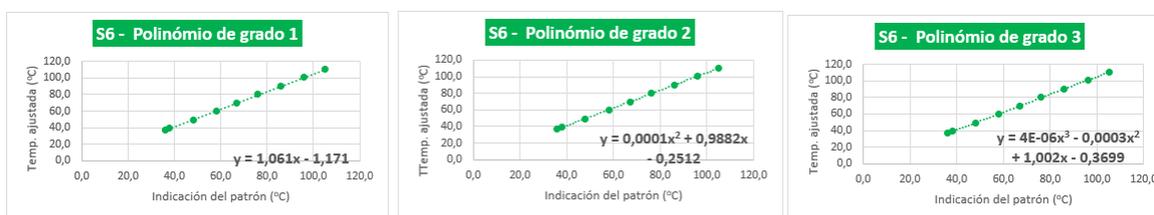


Figura 15 – polinomio grado 1,2,3 sensor 6 (S6).

**-Nota:** No se muestra la gráfica para el sensor 1 (S1) ya que este se encuentra fuera de servicio, como se mencionó en capítulos anteriores.

Ahora, se presentan los coeficientes de sensibilidad y la temperatura ajustada:

**Tabla 7** – coeficientes de los polinomios interpoladores

Grau	Coef.	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>5</sub>	T <sub>6</sub>
		S1	S2	S3	S4	S5	S6
1	a		1,3927	1,332	1,314	1,1269	1,061
	b		-10,962	-10,509	-9,2622	-3,2571	-1,171
2	a		0,0001	0,0002	0,0001	0,0001	0,0001
	b		0,9852	0,9784	0,9884	0,9884	0,9882
	c		-0,6692	-0,819	-0,2675	-0,1681	-0,2512
3	a		0,000001	0,000004	0,000004	2,00E-06	0,000004
	b		-0,000009	-0,0002	-0,0001	-0,0001	-0,0003
	c		0,99	0,9944	0,9957	0,9952	1,002
	d		-0,7114	-0,9613	-0,3304	-0,2257	-0,3699

**Tabla 8 – Temperatura ajustada**

Polinomio de grado 1						Polinomio de grado 2						Polinomio de grado 3					
T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>5</sub>	T <sub>6</sub>	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>5</sub>	T <sub>6</sub>	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>5</sub>	T <sub>6</sub>
S1	S2	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	°C
0,0	37,8	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
0,0	39,2	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
0,0	48,9	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
0,0	60,1	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
0,0	69,8	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
0,0	79,6	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
0,0	90,7	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
0,0	100,5	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
0,0	110,2	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 9 – Incertidumbre de ajuste**

Incertidumbre del Ajuste					
T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>5</sub>	T <sub>6</sub>
S1	S2	S3	S4	S5	S6
°C	°C	°C	°C	°C	°C
Grado 2	Grado 1				
	0,4203	0,5770	1,1770	0,3812	0,3918

**Tabla 10 – Factor de cobertura**

Factor de Cobertura (k)					
T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>5</sub>	T <sub>6</sub>
S1	S2	S3	S4	S5	S6
	2,36	2,36	2,36	2,36	2,36

**Tabla 11** – Resultado de la calibración

TEMPERATURA AJUSTADA							Error sistemático					
T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>5</sub>	T <sub>6</sub>	Patrón	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>5</sub>	T <sub>6</sub>
S1	S2	S3	S4	S5	S6	Valor medio	S1	S2	S3	S4	S5	S6
°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C
37,8	37,4	38,0	37,3	37,0	37,0	37,3	0,48	0,14	0,74	0,01	-0,27	
39,2	38,8	39,4	39,6	39,1	39,1	39,4	-0,22	-0,62	-0,04	0,17	-0,25	
48,9	49,4	49,9	49,7	49,8	49,8	49,5	-0,58	-0,07	0,37	0,21	0,26	
60,1	60,1	59,1	59,8	60,4	59,7	59,7	0,37	0,39	-0,63	0,15	0,67	
69,8	70,7	68,3	68,9	69,9	69,8	69,8	0,01	0,94	-1,54	-0,94	0,12	
79,6	80,1	80,1	80,1	79,5	80,0	80,0	-0,44	0,07	0,09	0,13	-0,54	
90,7	89,4	90,6	90,3	90,1	90,2	90,2	0,51	-0,81	0,40	0,08	-0,13	
100,5	100,0	102,4	100,4	100,7	100,4	100,4	0,05	-0,35	2,03	0,02	0,28	
110,2	110,7	109,0	110,6	110,2	110,4	110,4	-0,20	0,30	-1,40	0,16	-0,17	

**Tabla 12** – análisis de la incertidumbre.

**Análisis de incertidumbre**

Resolución del instrumento =	<b>1</b> °C	Incertidumbre del patrón	<b>0,01</b> °C
------------------------------	-------------	--------------------------	----------------

Análisis de Incertidumbre																		
Resolución del Instrumento						Inc. del patrón	Incertidumbre de Ajuste						Incertidumbre Expandida					
T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>5</sub>	T <sub>6</sub>	U <sub>p</sub> (k=2)	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>5</sub>	T <sub>6</sub>	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>5</sub>	T <sub>6</sub>
S1	S2	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	°C	°C
	0,5774	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	
	0,5774	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	
	0,5774	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	
	0,5774	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	
	0,5774	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	
	0,5774	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	
	0,5774	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	
	0,5774	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	

## Anexo B: Calibración de la balanza digital Trumax

Fotos de la calibración:





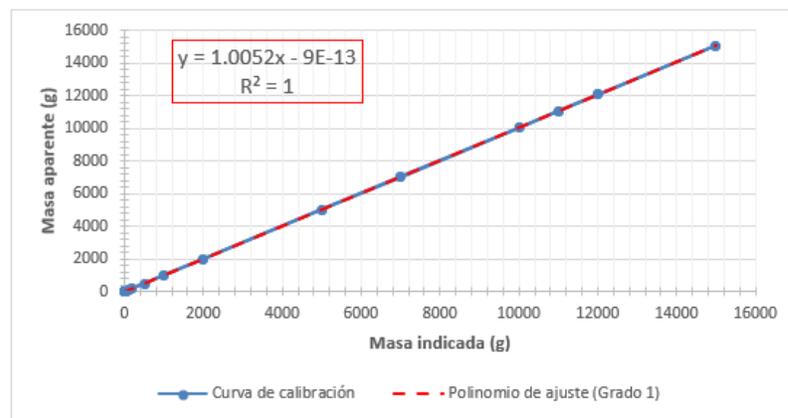
Tabla 13 – Calibración balanza (carga ascendente)

Carga Ascendente													
Puntos	Patrón		Balanza				Temperatura ambiente		Presión atmosférica		Masa específica del aire		
	Masa nominal	Incertidumbre (u)	Masa indicada	Masa aparente	Incertidumbre masa aparente	Indicado - aparente	Indicada	Incertidumbre	Indicación barómetro	Incertidumbre	Indicado	Incertidumbre	
	kg	kg	kg	kg	kg	kg	°C	°C	mbar/abs	mbar/abs	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	
1	0	0.00000	0.000	0.000	0.000000	0.000	27.7	0.25	1021.7	0.058	1.183	0.0010	
2	1	0.00000750	1.000	1.005	0.0000075	-0.005	27.7	0.25	1021.7	0.058	1.183	0.0010	
3	2	0.0000078	2.000	2.010	0.0000000	-0.010	27.7	0.25	1021.7	0.058	1.183	0.0010	
4	5	0.0000080	5.000	5.026	0.0000081	-0.026	27.7	0.25	1021.7	0.058	1.183	0.0010	
5	10	0.0000120	10.000	10.052	0.0000000	-0.052	27.7	0.25	1021.7	0.058	1.183	0.0010	
6	15	0.0000144	15.000	15.078	0.0000146	-0.078	27.7	0.25	1021.7	0.058	1.183	0.0010	
7	20	0.0000130	20.000	20.104	0.0000000	-0.104	27.7	0.25	1021.7	0.058	1.183	0.0010	
8	50	0.0000260	50.000	50.261	0.0000268	-0.261	27.7	0.25	1021.7	0.058	1.183	0.0010	
9	100	0.0000510	100.000	100.522	0.0000000	-0.522	27.7	0.25	1021.7	0.058	1.183	0.0010	
10	200	0.0001300	200.000	201.043	0.0001329	-1.043	27.7	0.25	1021.7	0.058	1.183	0.0010	
11	500	0.0006700	501.000	503.613	0.0000000	-2.613	27.7	0.25	1021.7	0.058	1.183	0.0010	
12	1000	0.0069000	1001.000	1006.221	0.0069440	-5.221	27.7	0.25	1021.7	0.058	1.183	0.0010	
13	2000	0.0069351	2002.000	2012.441	0.0000000	-10.441	27.7	0.25	1021.7	0.058	1.183	0.0010	
14	5000	0.08300000	5005.000	5031.103	0.0835185	-26.103	27.7	0.25	1021.7	0.058	1.183	0.0010	
15	7000	0.0832892	7007.000	7043.544	0.0000000	-36.544	27.7	0.25	1021.7	0.058	1.183	0.0010	
16	10000	0.17000000	10010.000	10062.206	0.1710618	-52.206	27.7	0.25	1021.7	0.058	1.183	0.0010	
17	11000	0.1701400	11011.000	11068.426	0.0000000	-57.426	27.7	0.25	1021.7	0.058	1.183	0.0010	
18	12000	0.17014140	12011.000	12073.642	0.1711192	-62.642	27.6	0.25	1021.7	0.058	1.184	0.0010	
19	15000	0.189180	15000.000	15078.231	0.190175	-78.231	27.6	0.25	1021.7	0.058	1.184	0.0010	

**Tabla 14 – Calibración balanza (carga descendente)**

Puntos	Carga Descendente											
	Patrón		Balanza				Temperatura ambiente		Presión atmosférica		Masa específica del aire	
	Masa nominal	Incertidumbre (u)	Masa indicada	Masa aparente	Incertidumbre masa aparente	Indicador - aparente	Indicada	Incertidumbre	Indicación barómetro	Incertidumbre	Indicador	Incertidumbre
	kg	kg	kg	kg	kg	kg	°C	°C	mbar/abs	mbar/abs	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>
1	0	0.00000	0.000	0.000	0.000000	0.000	27.5	0.25	1021.7	0.058	1.184	0.0010
2	1	0.00000750	1.000	1.005	0.0000075	-0.005	27.5	0.25	1021.7	0.058	1.184	0.0010
3	2	0.0000078	2.000	2.010	0.0000080	-0.010	27.5	0.25	1021.7	0.058	1.184	0.0010
4	5	0.0000080	5.000	5.026	0.0000081	-0.026	27.5	0.25	1021.7	0.058	1.184	0.0010
5	10	0.0000120	10.000	10.052	0.0000080	-0.052	27.5	0.25	1021.7	0.058	1.184	0.0010
6	15	0.0000144	15.000	15.078	0.0000146	-0.078	27.5	0.25	1021.7	0.058	1.184	0.0010
7	20	0.0000130	20.000	20.104	0.0000080	-0.104	27.5	0.25	1021.7	0.058	1.184	0.0010
8	50	0.0000260	50.000	50.261	0.0000268	-0.261	27.5	0.25	1021.7	0.058	1.184	0.0010
9	100	0.0000510	100.000	100.522	0.0000080	-0.522	27.5	0.25	1021.7	0.058	1.184	0.0010
10	200	0.0001300	200.000	201.043	0.0001329	-1.043	27.5	0.25	1021.7	0.058	1.184	0.0010
11	500	0.0006700	500.000	502.608	0.0000080	-2.608	27.5	0.25	1021.7	0.058	1.184	0.0010
12	1000	0.0069000	1000.000	1005.215	0.0069371	-5.215	27.5	0.25	1021.7	0.058	1.184	0.0010
13	2000	0.0069351	2000.000	2010.431	0.0000080	-10.431	27.5	0.25	1021.7	0.058	1.184	0.0010
14	5000	0.0830000	5000.000	5026.077	0.0834351	-26.077	27.5	0.25	1021.7	0.058	1.184	0.0010
15	7000	0.0832892	7000.000	7036.508	0.0000080	-36.508	27.5	0.25	1021.7	0.058	1.184	0.0010
16	10000	0.1700000	10000.000	10052.154	0.1708909	-52.154	27.5	0.25	1021.7	0.058	1.184	0.0010
17	11000	0.1701400	11000.000	11057.369	0.0000080	-57.369	27.5	0.25	1021.7	0.058	1.184	0.0010
18	12000	0.170141	12000.000	12062.584	0.171035	-62.584	27.5	0.25	1021.7	0.058	1.184	0.0010
19	15000	0.189180	15000.000	15078.231	0.0000080	-78.231	27.5	0.25	1021.7	0.058	1.184	0.0010

Polinomio de ajuste:



**Figura 16 – Curva de calibración balanza (polinomio de grado 1)**

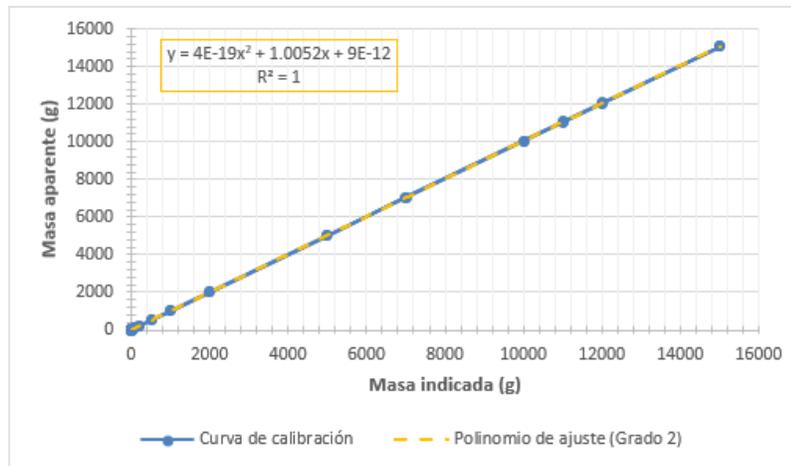


Figura 17 – Curva de calibración balanza (polinomio de grado 2)

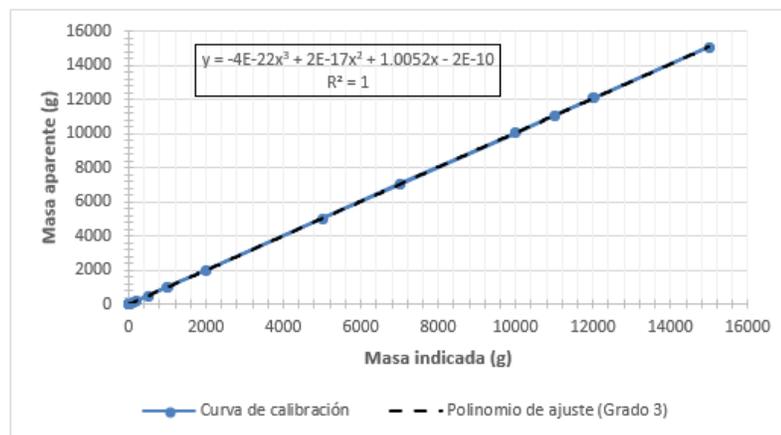


Figura 18 – Curva de calibración balanza (polinomio de grado 3)

**Tabla 15 – Resultado final de la calibración de la balaza**

	Puntos	RESULTADO FINAL							
		Masa Indicada	Masa ajustada	Incertidumbre de ajuste	Incertidumbre del patrón	Incertidumbre del instrumento	Incertidumbre patrón (u)	Incertidumbre Expandida (U)	Error
		g	g	g	g	g	g	g	g
<b>CARGA ASCENDENTE</b>	1	0	0	0.0937	0.0000000	0.2887	0.30	<b>0.62</b>	<b>0</b>
	2	1	1	0.0937	0.0000075	0.2887	0.30	<b>0.62</b>	<b>0</b>
	3	2	2	0.0937	0.0000078	0.2887	0.30	<b>0.62</b>	<b>0</b>
	4	5	5	0.0937	0.0000080	0.2887	0.30	<b>0.62</b>	<b>0</b>
	5	10	10	0.0937	0.0000120	0.2887	0.30	<b>0.62</b>	<b>0</b>
	6	15	15	0.0937	0.0000144	0.2887	0.30	<b>0.62</b>	<b>0</b>
	7	20	20	0.0937	0.0000130	0.2887	0.30	<b>0.62</b>	<b>0</b>
	8	50	50	0.0937	0.0000260	0.2887	0.30	<b>0.62</b>	<b>0</b>
	9	100	101	0.0937	0.0000510	0.2887	0.30	<b>0.62</b>	<b>-1</b>
	10	200	201	0.0937	0.0001300	0.2887	0.30	<b>0.62</b>	<b>-1</b>
	11	501	504	0.0937	0.0006700	0.2887	0.30	<b>0.62</b>	<b>-3</b>
	12	1001	1006	0.0937	0.0069000	0.2887	0.30	<b>0.62</b>	<b>-5</b>
	13	2002	2012	0.0937	0.0069351	0.2887	0.30	<b>0.62</b>	<b>-10</b>
	14	5005	5031	0.0937	0.0830000	0.2887	0.31	<b>0.64</b>	<b>-26</b>
	15	7007	7043	0.0937	0.0832892	0.2887	0.31	<b>0.64</b>	<b>-36</b>
	16	10010	10062	0.0937	0.1700000	0.2887	0.35	<b>0.71</b>	<b>-52</b>
	17	11011	11068	0.0937	0.1701400	0.2887	0.35	<b>0.71</b>	<b>-57</b>
	18	12011	12073	0.0937	0.1701414	0.2887	0.35	<b>0.71</b>	<b>-62</b>
	19	15000	15078	0.0937	0.1891798	0.2887	0.36	<b>0.73</b>	<b>-78</b>
<b>CARGA DESCENDENTE</b>	1	0	0	0.0937	0.0000000	0.2887	0.30	<b>0.62</b>	<b>0</b>
	2	1	1	0.0937	0.0000075	0.2887	0.30	<b>0.62</b>	<b>0</b>
	3	2	2	0.0937	0.0000078	0.2887	0.30	<b>0.62</b>	<b>0</b>
	4	5	5	0.0937	0.0000080	0.2887	0.30	<b>0.62</b>	<b>0</b>
	5	10	10	0.0937	0.0000120	0.2887	0.30	<b>0.62</b>	<b>0</b>
	6	15	15	0.0937	0.0000144	0.2887	0.30	<b>0.62</b>	<b>0</b>
	7	20	20	0.0937	0.0000130	0.2887	0.30	<b>0.62</b>	<b>0</b>
	8	50	50	0.0937	0.0000260	0.2887	0.30	<b>0.62</b>	<b>0</b>
	9	100	101	0.0937	0.0000510	0.2887	0.30	<b>0.62</b>	<b>-1</b>
	10	200	201	0.0937	0.0001300	0.2887	0.30	<b>0.62</b>	<b>-1</b>
	11	501	503	0.0937	0.0006700	0.2887	0.30	<b>0.62</b>	<b>-2</b>
	12	1001	1005	0.0937	0.0069000	0.2887	0.30	<b>0.62</b>	<b>-4</b>
	13	2002	2010	0.0937	0.0069351	0.2887	0.30	<b>0.62</b>	<b>-8</b>
	14	5005	5026	0.0937	0.0830000	0.2887	0.31	<b>0.64</b>	<b>-21</b>
	15	7005	7036	0.0937	0.0832892	0.2887	0.31	<b>0.64</b>	<b>-31</b>
	16	10009	10052	0.0937	0.1700000	0.2887	0.35	<b>0.71</b>	<b>-43</b>
	17	11011	11057	0.0937	0.1701400	0.2887	0.35	<b>0.71</b>	<b>-46</b>
	18	12011	12062	0.0937	0.1701414	0.2887	0.35	<b>0.71</b>	<b>-51</b>
	19	15000	15078	0.0937	0.1891798	0.2887	0.36	<b>0.73</b>	<b>-78</b>

## **Anexo C:**

### **Guía de Laboratorio del Motor de Combustión Interna**

**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA, ELECTRÓNICA Y BIOMÉDICA**

**PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**GUÍA DE LABORATORIO**

<b>Datos de identificación</b>	
<b>Nombre de la Asignatura:</b> Motores de combustión interna	<b>Número de la guía:</b> 1
<b>Unidad temática:</b> Determinación experimental de la eficiencia térmica de un motor de combustión interna	<b>Periodo académico de la asignatura:</b> 1er período

#### **Presentación Actividad**

Parte importante de los problemas de ingeniería se refieren a la transformación de la energía almacenada a flujos de trabajo y calor útiles, que a su vez puedan ser transformados posteriormente en energía almacenada nuevamente en otro tipo de acumulador, es en este aspecto donde surge la importancia de las máquinas térmicas, como son los

motores de combustión interna. Estas experiencias de laboratorio introducen al estudiante en el conocimiento correspondiente a los aspectos generales de los motores de combustión interna y aplicación práctica en el funcionamiento de los numerosos componentes que trabajan en estrecha interdependencia en la generación de energía.

### Objetivos de la Actividad

<b>Conceptual (plano cognitivo)</b>	<b>Procedimental (plano psicomotor)</b>	<b>Actitudinal (plano subjetivo)</b>
Proporcionar al estudiante las bases para realizar balances de masa y energía que tienen lugar en las máquinas térmicas.	Dar al estudiante elementos para cuantificar los procesos termofluido-dinámicos que tienen lugar en las máquinas como lo es un motor de combustión interna.	Profundizar los conocimientos en el proceso de combustión de las mezclas aire/combustible que tienen lugar al interior de los motores de combustión interna.

### Descripción de la actividad

#### Para iniciar la experiencia

- Al iniciar la actividad de la guía de laboratorio primeramente se deben verificar los niveles de los líquidos del motor como gasolina y aceite.

- Se debe verificar el funcionamiento de los equipos de medición: tacómetro, cronometro y balanza digital.
- Verificar que la válvula del paso del combustible esté abierta.
- Encender el motor de combustión interna.

### **Metodología experimental**

En esta experiencia los estudiantes deben seguir el siguiente procedimiento:

1. Realice el proceso de tara en la balanza digital y verifique que está completamente estable indicando en su *display* cero gramos (0 g).
2. Acelere el motor hasta que el tacómetro indique su máxima revolución que debe estar en 3500 RPM y suelte el acelerador hasta que el tacómetro indique 2000 RPM.
3. Inicie la toma de datos en 2000 RPM. Realice 4 mediciones por 60 segundos en las cuales debe anotar la masa inicial y la masa final indicada por la balanza en cada instante de la medición (anotar estos datos en la Tabla 1, ver anexo). Además, debe medir las temperaturas de los distintos procesos del motor de combustión y registrar estos datos en la Tabla 2 (ver anexo). La densidad de la gasolina puede ser considerada igual a 680 g/l. La temperatura indicada en el tablero está en grados Celsius.

### **Resultados asociados a la experiencia**

En el curso de los experimentos, los estudiantes deben aplicar los principios asociados al Ciclo Otto y responder las siguientes preguntas las cuales deben estar desarrolladas en la sección de **Resultados y Discusión** del informe de laboratorio que debe ser entregado dentro de los 8 días posteriores a la experiencia realizada:

1. Calcular el consumo específico de combustible para cada punto experimental en mililitros.
2. Aplicando la ecuación del cálculo del calor el cual es adquirido o transferido para un sistema  $Q = m \cdot C \cdot \Delta T$  (donde  $C$  denota el calor específico a volumen o presión constante, según sea el caso), determine: el calor transferido al sistema en el proceso de combustión y el calor transferido al medio ambiente en el proceso de escape.
3. Calcular la eficiencia térmica para cada punto experimental
4. Realice un gráfico de las RPM del motor contra: (i) el consumo específico del combustible; (ii) el calor asociado al proceso de combustión y escape; (iii) Eficiencia térmica del motor.
5. En todos los cuatro puntos anteriores, discuta los resultados obtenidos.

### **Informe que debe ser entregado al finalizar la experiencia**

El informe debe ser presentando en el formato aprobado por el sub-consejo de programa de la FIMEB en la Sede Puerto Colombia para la entrega de los informes de laboratorio. Este informe debe ser enviado a los estudiantes por parte del docente.

El número de personas que hacen parte del informe será definido por el docente responsable por la asignatura.

El informe debe contener:

- Introducción
- Revisión de la literatura
- Objetivos

- Metodología Experimental (debe incluir fotos de las experiencias realizadas)
- Resultados y discusión
- Conclusiones
- Referencias bibliográficas
- Anexos (opcional)
- Apéndices (opcional)

### Rúbrica de evaluación

Descripción del ítem	Porcentaje	Nota	Nota parcial	Observación
Uso del formato adecuado	5%			
Introducción	10%			
Revisión de la literatura	10%			
Objetivos	5%			
Metodología Experimental (debe incluir fotos de las experiencias realizadas)	15%			
Resultados y discusión	40%			
Conclusiones	10%			
Uso correcto de la norma IEEE y citación de las referencias bibliográficas	5%			

## **Asesoría**

Para la asesoría personalizada, el profesor informa a los estudiantes de los horarios disponibles para atención en su oficina.

## **Actividades Tutoriales o Encuentros de Clase**

El profesor enseñará los fundamentos necesarios para el desarrollo de esta actividad en las horas de clase dispuestas para la asignatura en cada semestre.

## **Fuentes de información o referencias bibliográficas**

### **Textos Guía**

- OBERS J. Motores. Editorial Ceca.
- JOVAJ M.S. Motores del automóvil. Editorial Mir Moscú.
- ARIAS PAZ. Automóviles.
- NASH FREDERICK. Fundamentos de mecánica automotriz.
- SANZ GONZÁLEZ, ÁNGEL. Tecnología de la automoción 4. Ediciones Don Bosco. Barcelona.
- SANZ GONZÁLEZ, ÁNGEL. Tecnología de la automoción 2.2. Ediciones Don Bosco. Barcelona.
- Rovira Antonio, Muñoz Marta. Motores de Combustión interna. 2012 U. Nacional de Educación a Distancia. ISBN. 978 3 642 17531 2
- ALONSO PÉREZ J.M. Técnicas del automóvil. Editorial Paraninfo

### **Textos complementarios**

- TOLEDO MIGUEL, Termodinámica de las turbinas de Gas. Alfaomega. Primera Edición, 2004, México.
- CROUSE Y ANGLIN, Puesta a punto y rendimiento del motor. Alfaomega. Tercera Edición, 2005, México.
- THONON, Motores de Gasolina. Alfaomega. Primera Edición. Alfaomega. Primera Edición, 2004, México.
- POURBAIX, Motores Diesel. Alfaomega. Primera Edición. Alfaomega. Primera Edición, 2004, México.
- Yunus A. Cengel, Michael A. Boles, Termodinámica. Edit. Mc. Graw. Hill
- Gordon J. Van Wylen, Fundamentos de Termodinámica, Edit. Limusa.
- J. M. Smith, H. C. Van Ness. Introducción a la termodinámica en Ingeniería Química, Edit. Mc. Graw. Hill
- Arrègle, Jean (2002). Procesos y tecnología de máquinas y motores térmicos España: Universidad Politécnica de Valencia.
- Bermúdez Tamarit, Vicente (2000). Tecnología energética. España: Universidad Politécnica de Valencia.
- Lucas Martínez, Antonio de (2007). [Termotecnia básica para ingenieros químicos: procesos termodinámicos y máquinas]. España: Universidad de Castilla-La Mancha.
- Bermúdez "Tecnología Energética", Editorial de la Universidad Politécnica de Valencia, 2000.
- J.M. Sala Lizarraga. "Cogeneración", Servicio Edit. Universidad del País Vasco Bilbao, 1994.
- A. Valero et al. "Análisis Exergético y Termoeconómico", ETSII - Zaragoza, 1987.
- "Manual de Eficiencia energética y Térmica en la Industria", CADEM.

- Dorf. "Energy, Resources, and Policy", Addison-Wesley Publishing Company, 1978.
- Fowler. "Energy and the Environment", McGraw-Hill, 2 ed., 1984.
- Muñoz, F. Payri. "Motores de Combustión Interna Alternativos", 2ª Edición, Servicio de Publicaciones de la Universidad Politécnica de Valencia, 1986.
- Muñoz, F. Payri. "Turbomáquinas Térmicas", Sección de Publicaciones ETSII Universidad Politécnica Madrid, 1978.
- T.J. Kotas. "The Exergy Method of Thermal Plant Analysis", Butterworths, London, 1985.
- J. Szargut, D.R. Morris y F.R. Steward. "Exergy Analysis of Thermal, Chemical and Metallurgical Processes", 2ª Edición, Hemisphere, New York, 1988.

## **Anexos**

Fotos del motor de combustión interna ubicado en Laboratorio de Máquinas Térmicas y Termofluidos de la Universidad Antonio Nariño Sede Puerto Colombia:



**Figura 1** – Motor de combustión interna



**Figura 2** – Tacómetro analógico



**Figura 3** – Balanza digital



**Figura 4** – Tablero de temperatura digital

**TABLAS DE REGISTRO DE DATOS EXPERIMENTALES****Tabla 1** – Datos para el cálculo del consumo de combustible

No	Tiempo (s)	RPM	Masa inicial, Mi (g)	Masa Final, Mf (g)	Mi - Mf (g)	Densidad Gasolina (g/l)	Volumen Consumido (ml)
1	60	2000					
2	60	2000					
3	60	2000					
4	60	2000					
5	60	2500					
6	60	2500					
7	60	2500					
8	60	2500					
9	60	3000					
10	60	3000					
11	60	3000					
12	60	3000					
13	60	3500					
14	60	3500					
15	60	3500					
16	60	3500					

**Tabla 2** – Registro de la temperatura de los procesos termodinámicos

No	Tiempo (s)	RPM	Temperatura en la compresión (T2)	Temperatura en la combustión (T3)	Temperatura en la admisión (T5)	Temperatura en el escape (T6)
1	60	2000				
2	60	2000				
3	60	2000				
4	60	2000				
5	60	2500				
6	60	2500				
7	60	2500				
8	60	2500				
9	60	3000				
10	60	3000				
11	60	3000				
12	60	3000				
13	60	3500				
14	60	3500				
15	60	3500				
16	60	3500				