



Evaluación de la Influencia de la curva de calibración analítica en la confiabilidad metrológica de un ciclo Otto

Samyr José Rico Siado
Cristian Xavier Zapata Fernández

Universidad Antonio Nariño
Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica
Puerto Colombia, Colombia
2023

Evaluación de la Influencia de la curva de calibración analítica en la confiabilidad metrológica de un ciclo Otto

Samyr José Rico Siado
Cristian Xavier Zapata Fernández

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
2023

Este logro está dedicado a Dios, a nuestras familias y todas esas personas importantes que hicieron posible este éxito en nuestra carrera profesional. Para todos ellos nuestra gratitud y nuestra oración.

Samyr José Rico Siado

Cristian Xavier Zapata Fernández

Agradecimientos

Os autores agradecemos a Dios, a nuestras familias y nuestros amigos por acompañarnos en todo este proceso. Agradecemos a la Universidad Antonio Nariño por permitirnos formarnos como profesionales al servicio de la sociedad. Agradecemos a nuestro tutor, el Ing. José Daniel Hernández, por acompañarnos en todo este proceso de desarrollo experimental y documental. A todos los docentes y cuerpo administrativo de nuestra alma mater, por todo el apoyo recibido durante estos años de estudio. A todos, muchas gracias.

Samyr José Rico Siado

Cristian Xavier Zapata Fernández

Resumen

Esta propuesta de Trabajo Integral de Grado (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, esta propuesta tiene como objetivo principal analizar el funcionamiento de un ciclo Otto, evaluando la Influencia del uso de las curvas de calibración analítica como herramienta para el aumento de la confiabilidad metrológica en este ciclo termodinámico, estableciendo comparativas entre distintas metodologías y resaltando la importancia del uso de esta técnica para la obtención de valores más cercanos a la realidad. Así mismo, se espera la publicación de artículos científicos en una revista SCOPUS en el marco del proyecto de investigación aprobado por la VCTI.

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

Abstract

This Comprehensive Degree Work (TIG) proposal is framed within a research project approved by the Vice-Rector 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 this sense, the main objective of this proposal is to analyze the operation of an Otto cycle, evaluating the influence of the use of analytical calibration curves as a tool to increase metrological reliability in this thermodynamic cycle, establishing comparisons between different methodologies and highlighting the importance of using this technique to obtain values closer to reality. Likewise, the publication of scientific articles in a SCOPUS journal is expected within the framework of the research project approved by the VCTI.

Keywords: Internal combustion engine, multicriteria method, AHP, calibration, metrology.

Contenido

1. Introducción	15
1.1 Formulación del problema	15
1.2 Objetivos.....	16
1.2.1 Objetivo general	16
1.2.2 Objetivos específicos.....	16
1.3 Justificación	17
1.4 Diseño metodológico.....	17
FASE 1: Investigativa	18
FASE 2: Diseño y Elaboración de cálculo	18
FASE 4: Conclusiones y recomendaciones.....	18
2. Mediciones mecánicas en un motor de combustión interna: normatividad aplicada	20
2.1 Normatividad Aplicada	21
2.1.1 Medición de Presión	21
2.1.2 Medición de Masa	22
2.1.3 Medición de Fuerza y Torque.....	23
2.1.4 Metrología Dimensional.....	24
2.1.5 Medición de Temperatura	25
2.1.6 Medición de Volumen	26
2.1.7 Medición de Humedad.....	27
2.1.8 Medición de magnitudes Eléctricas.....	28
2.2 Metodología estadística para el análisis de sensores de temperatura	29
2.3 Mínimos cuadrados ordinarios.....	29
2.4 Cálculo de la incertidumbre combinada y expandida.....	31
2.5 Test de hipótesis t-student.....	32
3. Influencia de la curva de calibración analítica en la confiabilidad metrológica de un ciclo Otto	34
3.1 Calibración de los sensores de temperatura	36
3.2 Eficiencia térmica del ciclo Otto	44
3.2.1 Método #1: medición directa de temperatura (sin corregir).....	44
3.2.2 Método #2: utilizando un polinomio interpolador para corregir el valor de la temperatura	49
3.2.3 Método #3: utilizando el error sistemático para corregir el valor de la temperatura	53
3.2.4 Comparación de resultados	58
4. Conclusiones y recomendaciones	60

Bibliografía 62

Lista de figuras

Figura 1 - Metrología de Presión: Normas Aplicadas	22
Figura 2 - Metrología de Masa: Norma Aplicada	22
Figura 3 - Metrología de Fuerza: Normas Aplicadas	23
Figura 4 - Par Torsional: Normas Aplicadas	24
Figura 5 - Metrología Dimensional: Normas Aplicadas.....	25
Figura 6 - Metrología Térmica: Normas Aplicadas	26
Figura 7 - Volumen: Normas Aplicadas.....	27
Figura 8 - Humedad relativa: Normas Aplicadas	28
Figura 9 - Metrología eléctrica: Normas Aplicadas	29
Figura 10 – Área de ensayo del motor de combustión interna	34
Figura 11 – Características del motor de combustión interna	36
Figura 12 – Polinomios de ajuste	39
Figura 13 – Resultados consolidados	44
Figura 14 – Consumo específico de combustible	46
Figura 15 – Consumo volumétrico de combustible	46
Figura 16 – Calor de entrada al proceso (Q_{in}) y calor perdido en el proceso (Q_{out})	47
Figura 17 – Trabajo realizado.....	48
Figura 18 – Eficiencia térmica y ecuación de rendimiento	48
Figura 19 – Consumo específico de combustible	50
Figura 20 – Consumo volumétrico de combustible	51
Figura 21 – Calor de entrada al proceso (Q_{in}) y calor perdido en el proceso (Q_{out})	52
Figura 22 – Trabajo realizado.....	52
Figura 23 – Eficiencia térmica y ecuación de rendimiento	53
Figura 24 – Consumo específico de combustible	55
Figura 25 – Consumo volumétrico de combustible	55
Figura 26 – Calor de entrada al proceso (Q_{in}) y calor perdido en el proceso (Q_{out})	56
Figura 27 – Trabajo realizado.....	57
Figura 28 – Eficiencia térmica y ecuación de rendimiento	57
Figura 29 – Eficiencia térmica y ecuación de rendimiento comparando los tres métodos	59

Lista de tablas

Tabla 1. Fundamentación teórica del método de los mínimos cuadrados.....	29
Tabla 2 – Datos experimentales.....	37
Tabla 3 – Cálculo del error sistemático sin ajuste	38
Tabla 4 – Coeficientes de los polinomios.....	40
Tabla 5 – Temperatura ajustada	40
Tabla 6 – Determinación del error cuadrático	41
Tabla 7 – Incertidumbre de ajuste.....	42
Tabla 8 – Componentes de la incertidumbre expandida	42
Tabla 9 – Error sistemático ajustado.....	43
Tabla 10 – Datos experimentales.....	45
Tabla 11 – Consumo específico y volumétrico de combustible.....	45
Tabla 12 – Calor de entrada (Q_{in}), calor de salida (Q_{out}).....	47
Tabla 13 – Datos experimentales.....	49
Tabla 14 – Consumo específico y volumétrico de combustible.....	50
Tabla 15 – Calor de entrada (Q_{in}), calor de salida (Q_{out}).....	51
Tabla 16 – Datos experimentales.....	53
Tabla 17 – Consumo específico y volumétrico de combustible.....	54
Tabla 18 – Calor de entrada (Q_{in}), calor de salida (Q_{out}).....	56
Tabla 19 – Calor de entrada (Q_{in}), calor de salida (Q_{out}).....	58

1. Introducción

El desarrollo de la humanidad en los últimos 3 siglos ha estado marcado por el avance de su industria. La masificación de la producción, las técnicas utilizadas, la competencia por los nichos de mercado y el beneficio económico que se desea obtener en cada ámbito productivo y comercial que rodea la creación de un producto o la prestación de servicios específicos, han hecho necesario el uso de estrategias y técnicas de medición que estandaricen y optimicen los distintos procesos.

Para lograr este objetivo, se ha desarrollado técnicas y metodologías que permiten modelar con mayor exactitud los fenómenos físicos que intervienen en sus procesos; además del estudio de estos fenómenos, se ha dedicado un gran esfuerzo en perfeccionar las técnicas y los métodos de medición, convirtiendo a la metrología en un pilar de la industria. Un factor de gran relevancia en los sectores productivos de la actualidad, es el uso eficiente de la energía, la transferencia de la misma y la optimización de los recursos disponibles.

1.1 Formulación del problema

Con el avance de la tecnología, el hombre ha decidido transformar/optimizar los recursos y la energía existente en la naturaleza, enfocándola hacia un uso que beneficie al ser humano tanto en su vida cotidiana como en el funcionamiento de sus organizaciones.

Los motores de combustión interna es una tecnología que se encuentran en un sinnúmero de industrias, son una parte fundamental en los sistemas de máquinas y equipos

empleados para la fabricación o procesamiento de un producto, estos tienen diversas funciones, que en conjunto permiten realizar los procesos de transferencia de calor entre dos fluidos, o entre la superficie de un sólido y un fluido en movimiento.

Determinar la exactitud, confiabilidad de las mediciones y la efectividad en la transferencia de calor en estos instrumentos, es un tema trascendental para la industria, así como optimizar esta tecnología.

Factores tales como la exactitud, la confiabilidad, las correcciones de las mediciones y la efectividad del sistema en los intercambiadores de calor, puede verse afectado por un mal uso de herramientas estadísticas con base en la metrología, impidiendo obtener valores confiables y precisos que ayuden a la efectividad de los sistemas y la toma de decisiones.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Evaluar la Influencia de la curva de calibración analítica en la confiabilidad metrológica de un ciclo Otto.

1.2.2 Objetivos específicos

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

- Realizar la calibración de los sensores de temperatura, con el propósito de conocer el error medición asociado a la temperatura y su incertidumbre.
- Calcular las presiones asociadas a cada etapa del ciclo Otto, así como la incertidumbre asociada en cada etapa, con el fin de conocer la confiabilidad en el cálculo de la relación de presión del motor.
- Calcular la eficiencia térmica del ciclo Otto a partir de la medición de temperatura sin corrección, datos corregidos por el error sistemático y datos corregidos por la curva analítica de calibración.

1.3 Justificación

Este proyecto pretende mediante razones técnicas, ajustar las mediciones que se realicen a las condiciones reales, mediante una aplicación de curvas analíticas de calibración para la confiabilidad metrológica en la medición de los parámetros a controlar en un intercambiador de calor de tubo y coraza.

En la práctica, diferentes aspectos intervienen en el comportamiento y la confiabilidad de las mediciones, ya sea la naturaleza de un proceso, las características de los instrumentos de medición utilizados, las condiciones de trabajos, la correlación de las variables, y otros factores que determinan el comportamiento particular del modelo físico estudiado, por lo tanto, la aplicación de la curva de calibración analítica puede brindar las herramientas necesarias para optimizar los esfuerzos requeridos para el cumplimiento y control deseado del proceso, acercándonos a la realidad del fenómeno físico.

El presente proyecto beneficia a los usuarios (fabricantes y usuarios de los equipos) que se encuentren relacionados con los sistemas de calefacción, refrigeración, acondicionamiento de aire, producción de energía y procesamiento químico; al brindarle a las organizaciones herramientas robustas que permitan tener seguridad y confianza en las mediciones que se realicen, cumpliendo los requisitos de un proceso, los estándares de calidad requeridos y brindando confianza a los clientes externos e internos.

Invitar a otras empresas para que implementen la curva de calibración analítica en la confiabilidad metrológica de un ciclo Otto, alcanzando una mayor exactitud al realizar sus mediciones y adecuándolos a sus procesos específicos, a su vez trayendo consigo beneficio a sus clientes internos y externos.

1.4 Diseño metodológico

El desarrollo del presente proyecto se apoyará de una revisión preliminar del estado del arte, continuando con el plan de trabajo que se describe a continuación, en función de cada objetivo específico originalmente formulado. Inicialmente, será realizada una inspección previa para conocer los componentes mecánicos que deben ser reemplazados y/o realizarles un mantenimiento preventivo. En relación con el cumplimiento de los objetivos,

se tiene:

La metodología propuesta en este trabajo investigativo estuvo compuesta por tres (3) fases esenciales, definidas de la siguiente forma:

- Fase 1: Investigativa
- Fase 2: Diseño y Elaboración de cálculos
- Fase 3: Conclusiones y recomendaciones

A seguir se presenta detalladamente la descripción de cada una de estas fases.

FASE 1: Investigativa

- **Búsqueda y recopilación de información**

Como primera medida se realizará una revisión bibliográfica referente a normas y métodos representativos utilizados, antecedentes de trabajos anteriores, artículos científicos revistas, etc., en metrología y diseños de software para así recopilar la información concerniente a la investigación propuesta.

- **Identificación de parámetros para el cálculo de incertidumbre**

La incertidumbre de medición es un parámetro fundamental que debe estar reportado en un certificado de calibración según las directrices establecidas por la ISO/IEC 17025. En ese sentido, esta etapa se propone a identificar los principales parámetros que deben ser considerados para la estimación de la incertidumbre en micrómetros, calibrador pie de rey y flexómetros.

FASE 2: Diseño y Elaboración de cálculo

- **Desarrollo de las ecuaciones**

En esta etapa se desarrollarán una serie de análisis relacionados al cálculo de incertidumbre, errores y curva de calibración de los distintos sensores de temperatura. Además, se desarrollará toda la parte experimental del proyecto de grado.

FASE 4: Conclusiones y recomendaciones

- **Elaboración de conclusiones**

En esta etapa se redactarán las principales conclusiones del proyecto investigativo, haciendo énfasis en las principales contribuciones del mismo, en función de los objetivos específicos originalmente formulados.

- **Redacción del documento final y sustentación del proyecto de grado**

En esta etapa se redactarán las principales conclusiones del proyecto investigativo, haciendo énfasis en las principales contribuciones del mismo, en función de los objetivos específicos originalmente formulados.

2. Mediciones mecánicas en un motor de combustión interna: normatividad aplicada

Asegurar la confiabilidad metrológica en los procesos a nivel industrial es un desafío que compete a la ciencia de las Mediciones. En ese sentido, un Laboratorio de Metrología debe, constantemente, evaluar, mejorar y garantizar su competencia, de modo a contribuir de forma positiva a la gestión metrológica de los distintos procesos de medición a nivel industrial. Así, realizar la calibración periódica de instrumentos que impacten de forma crítica en la gestión metrológica de procesos, se torna una estrategia fundamental en pro de obtener resultados confiables y de calidad. En este punto, vale la pena resaltar que, existe una multiplicidad de normas nacionales e internacionales, recomendaciones, reglamentos internos validados, entre otros documentos, que establecen los procedimientos de calibración y análisis estadístico de resultados (i.e.: cálculo de errores e incertidumbre).

En términos específicos, este informe muestra, a partir de un estudio detallado y extenso análisis bibliográfico, la consolidación de dos propósitos perseguidos: (i) identificar la normatividad nacional e internacional aplicada a la calibración de cada instrumento de medición en un motor de combustión interna; (ii) evaluar la conformidad de los sensores de temperatura a la luz de la normatividad vigente.

2.1 Normatividad Aplicada

A partir de la información disponible por el Organismo Nacional de Acreditación de Colombia (ONAC), fue posible identificar la normatividad nacional e internacional aplicada a la calibración de la instrumentación para un motor de combustión. Esta normatividad es utilizada por diversos laboratorios de metrología acreditados en Colombia. Las secciones subsecuentes sintetizan el estudio bibliográfico realizado.

2.1.1 Medición de Presión

En la metrología de presión fueron identificados tres procedimientos de calibración internacionales aplicados a manómetros digitales/analógicos y vacuómetros. Los procedimientos fueron desarrollados por el Centro Español de Metrología (CEM), el Centro Nacional de Metrología de México (CENAM) y el Servicio Alemán de Calibración (DKD):

- **CEM:** Procedimiento ME-003 para la calibración de manómetros, vacuómetros y manovacúómetros (2008)
- **CENAM:** guía técnica sobre trazabilidad e incertidumbre en los servicios de calibración de manómetros, transductores y transmisores de presión de elemento elástico (2008)
- **DKD:** Calibración de instrumentos medidores de presión (Español. 2014)

La Figura 1 ilustra la cantidad de laboratorios acreditados en la magnitud de presión, considerando la normatividad aplicada y el tipo de instrumento. Se puede observar que, a pesar que otros documentos están disponibles en la literatura, para el caso de manómetros digitales/analógicos y vacuómetros, un número mayor de laboratorios acreditados aplican el procedimiento descrito en la DKD-R 6-1:2014.

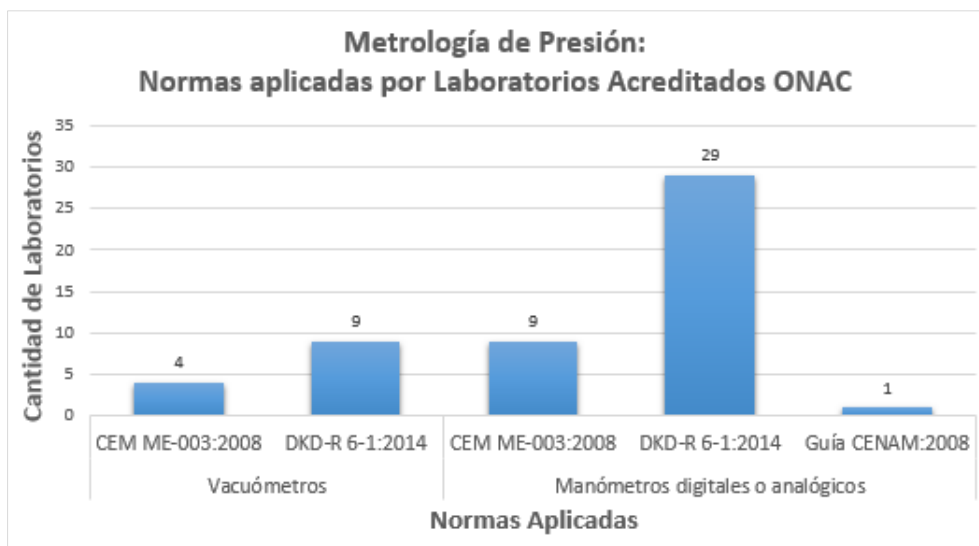


Figura 1 - Metrología de Presión: Normas Aplicadas

2.1.2 Medición de Masa

Para el caso de la Metrología de Masa fue confirmado que el total de laboratorios acreditados aplica el procedimiento descrito en la Guía SIM (2009). La Figura 2 confirma esta situación.

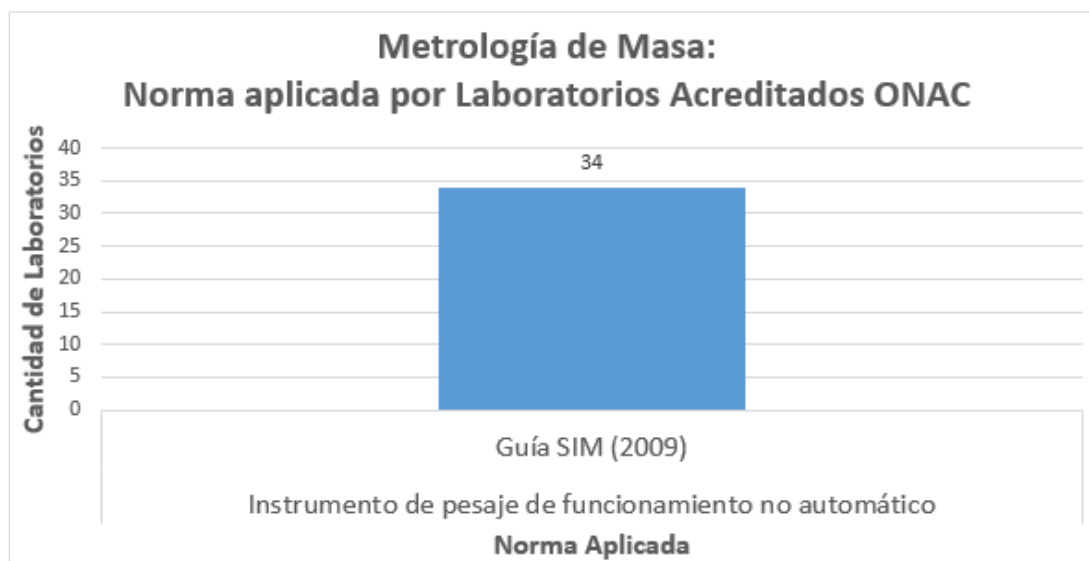


Figura 2 - Metrología de Masa: Norma Aplicada

2.1.3 Medición de Fuerza y Torque

Para el caso de la normatividad aplicada a la calibración de instrumentos para la medición de fuerza, fueron identificados tres procedimientos de calibración aplicados a dinamómetros y celdas de cargas: Procedimiento Interno: LM-PC-27:2016; ABNT NBR 8197:2012; NTC ISO 7500-1:2007.

La Figura 3 ilustra resume la cantidad de laboratorios acreditados en la magnitud de fuerza, considerando la normatividad aplicada y el tipo de instrumento. Se puede observar que la norma NTC ISO 7500-1:2007 es la más utilizada por los laboratorios acreditados ONAC para la calibración de Dinamómetros y Celdas de carga.

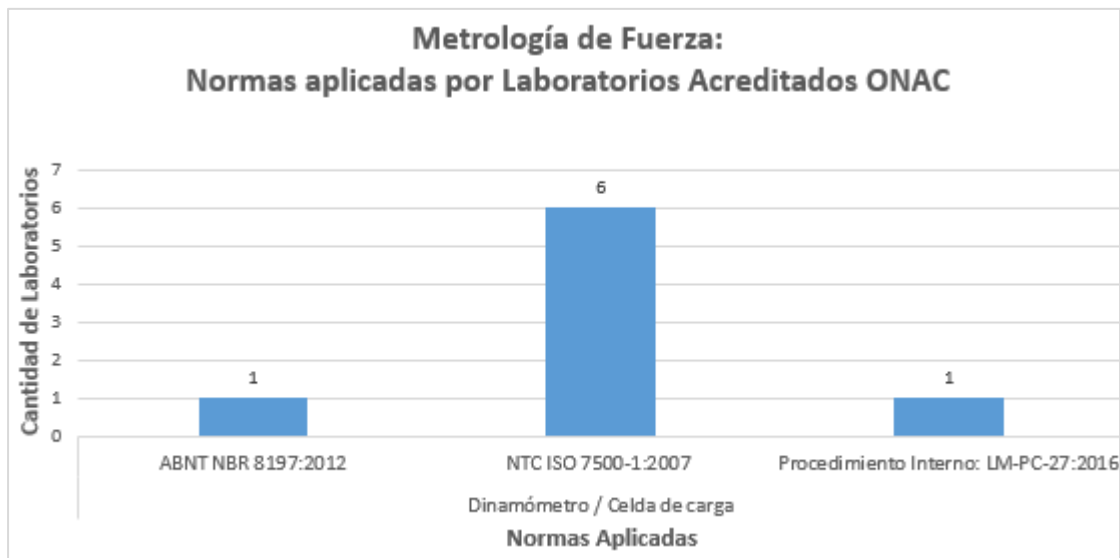


Figura 3 - Metrología de Fuerza: Normas Aplicadas

En la relación a la medición de Torque (Par Torsional), dos fueron los documentos normativos identificados y que son aplicados por ocho laboratorios acreditados ONAC:

- **CEM ME-004:2008:** Procedimiento ME-004 para la calibración de herramientas dinamométricas
- **NTC 5330:2004:** Herramientas de ensamble para tornillos y tuercas. torcómetros manuales (herramienta manual de par torsional). requisitos y métodos de ensayo

para la determinación de la conformidad del diseño, la calidad y para el procedimiento de recalibración

La Figura 4 ilustra la cantidad de laboratorios acreditados en la medición de par torsional, considerando la normatividad aplicada y el tipo de instrumento. Se puede observar que existe una equivalencia en cuanto la cantidad de laboratorios que aplican la normatividad referenciada para la medición de par torsional.

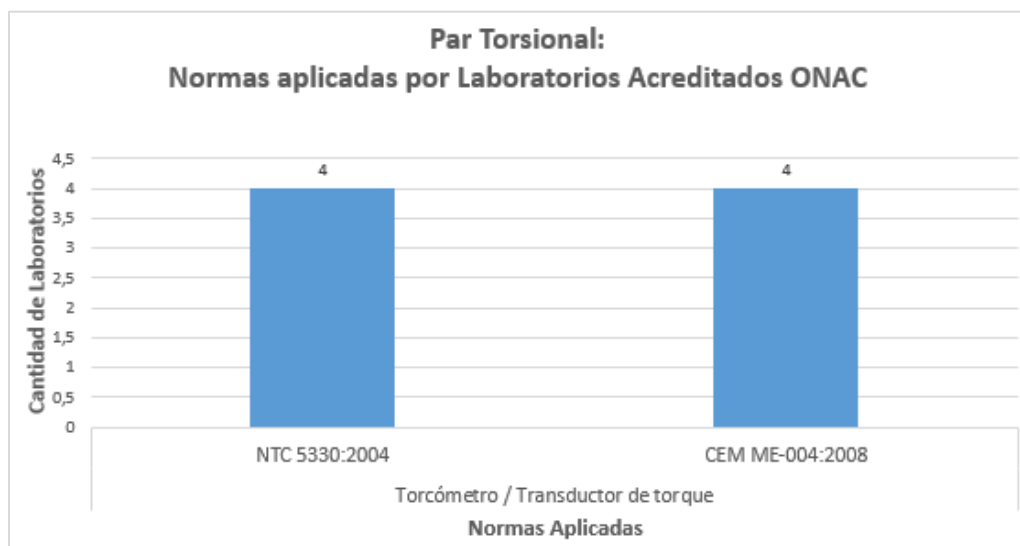


Figura 4 - Par Torsional: Normas Aplicadas

2.1.4 Metrología Dimensional

En metrología dimensional existen diversas normas y procedimientos para la calibración de los distintos instrumentos, según sus características y principio físico de medición. La Figura 5 ilustra las distintas normas aplicadas en función del instrumento de medición.

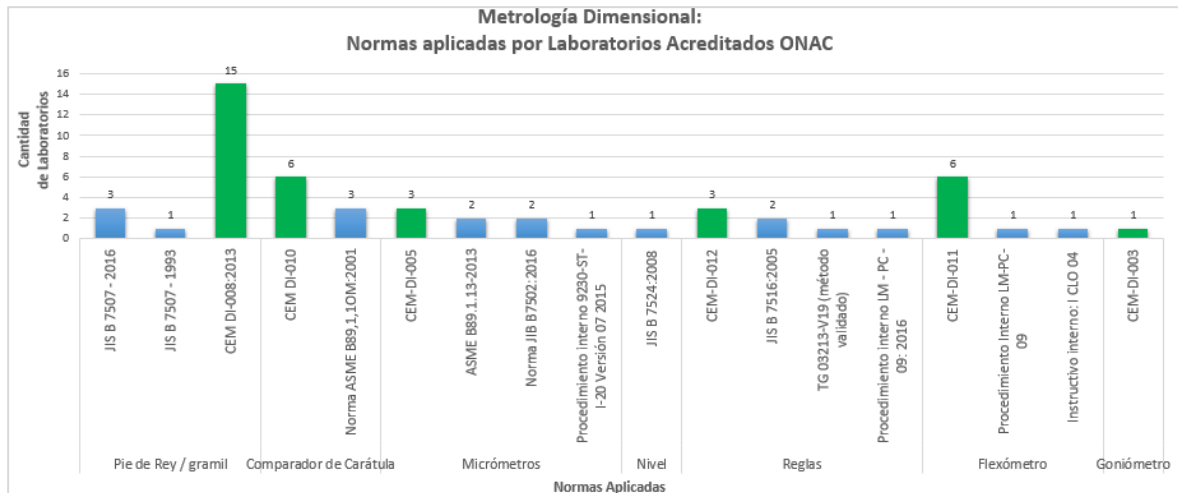


Figura 5 - Metrología Dimensional: Normas Aplicadas

A pesar que diversos procedimientos de calibración pueden ser utilizados para un mismo instrumento, la figura anterior muestra un destaque en verde para aquellos más utilizados por los laboratorios de metrología dimensional acreditados ONAC. A título de ejemplo, observase que para la calibración de Pie de Rey/Gramil, 15 laboratorios aplican el procedimiento DI-008:2013 (procedimiento para la calibración de pies de rey) establecido por el CEM. En particular, fue identificado un único laboratorio acreditado para la calibración de Goniómetros, cuya normatividad corresponde al DI-003 del Centro Español de Metrología.

2.1.5 Medición de Temperatura

En la metrología térmica, los documentos normativos identificados están orientados a la calibración de dos situaciones: (i) Termómetro de contacto digital, bimetálico, Resistencia y Termopar; (ii) Termómetro de Líquido en Vidrio (TLV). Para la primera situación fue observado que la norma NT VVS 103:1994 “*Thermometers, Contact, Direct Reading*” es aplicada por una mayor cantidad de laboratorios cuando comparada por el procedimiento CEM TH-001 (calibración de termómetros digitales). Por otro lado, en la segunda situación (calibración de TLV), existe una equivalencia en cuanto el uso, por la norma NT VVS 102:1994 “*Thermometers, Liquid-In-glass: calibration*” y el procedimiento CEM TH-004

(Calibración por comparación de termómetros de columna de líquido). La Figura 6 ilustra la situación descrita.

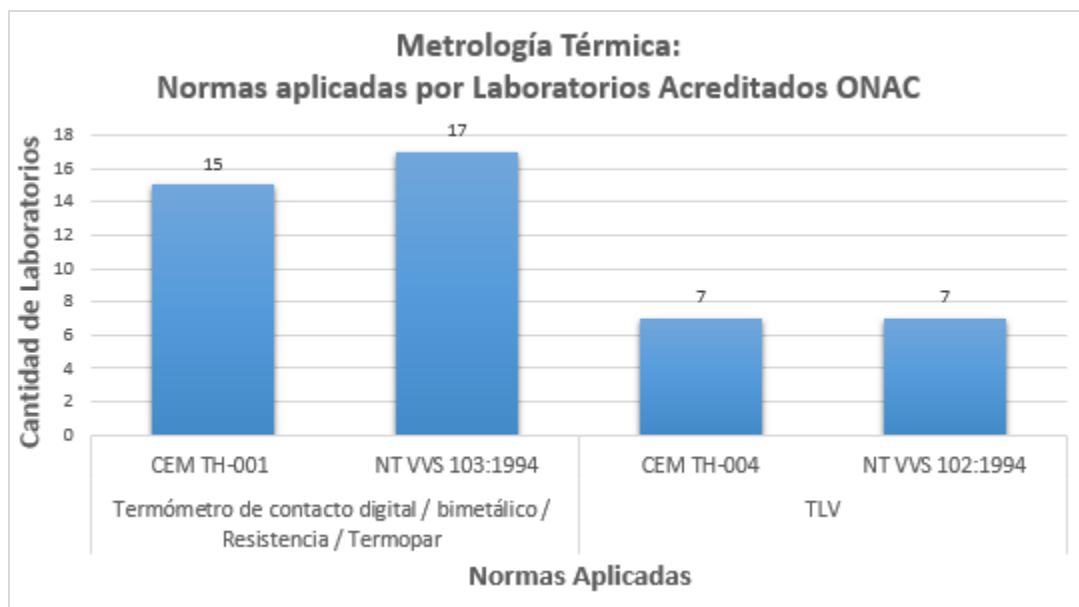


Figura 6 - Metrología Térmica: Normas Aplicadas

2.1.6 Medición de Volumen

Para el caso de la medición de volumen fueron identificadas normas para dos tipos de instrumentos: (i) Pipetas (volumen variado-pistón): esta clasificación incluye pipetas, micropipetas e instrumentos para medición de volumen de desplazamiento positivo; (ii) Recipientes volumétricos de llenado y/o vaciado: esta clasificación incluye instrumentos de vidriería de laboratorio, tales como: beaker, probetas, buretas; balón. Para la primera situación, la revisión de la literatura confirmó que 10 laboratorios hacen uso de la norma ISO 8655-6:2002 "Piston-operated volumetric apparatus — Part 6: Gravimetric methods for the determination of measurement error". Es interesante observar que la citada norma tiene una correspondiente NTC (Norma Técnica Colombiana) de la cual cuatro laboratorios acreditados hacen uso, NTC/ISO-2014: Equipos volumétricos accionados mediante pistón. Parte 6: métodos gravimétricos para la determinación del error de medición.

Para la segunda situación (Recipientes volumétricos de llenado o vaciado), la Guía CENAM publicada en 2016 (*Guía Técnica sobre trazabilidad metrológica de incertidumbre de medida en los servicios de calibración de recipientes volumétricos por el método gravimétrico. Revision 03 - 2016-08-15*) por el Centro Nacional de Metrología de México es utilizada por seis laboratorios de metrología térmica acreditados ONAC.

La Figura 7 resume la situación descrita para la medición de volumen.

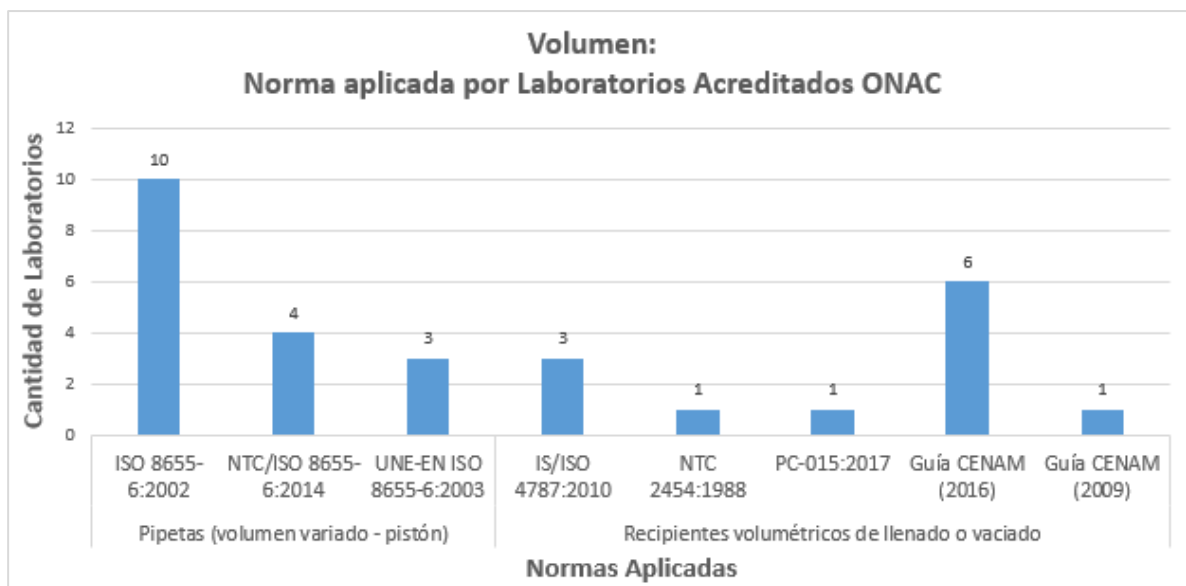


Figura 7 - Volumen: Normas Aplicadas

2.1.7 Medición de Humedad

Para la calibración de medidores de humedad (Termohigrómetros digitales o analógicos) la investigación confirmó que tres laboratorios acreditados utilizan la Guía Técnica de Higrometría publicada por el CENAM (2013), tres laboratorios acreditados utilizan el procedimiento TH-007 (*Procedimiento para la calibración de medidores de condiciones ambientales de Temperatura y Humedad Relativa edición digital 1, CEM*) publicado por el CEM y un único laboratorio utiliza el procedimiento para la calibración de medidores de humedad publicado en el 2015 por el INTI. Esta situación es ilustrada en la Figura 8.

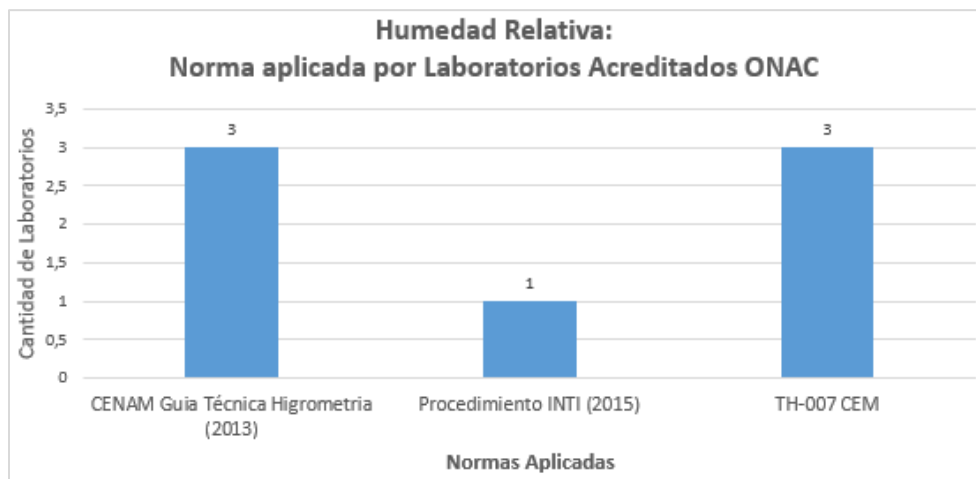


Figura 8 - Humedad relativa: Normas Aplicadas

2.1.8 Medición de magnitudes Eléctricas

Para el caso de las mediciones de magnitudes eléctricas (Tensión / Corriente), fue identificado que para la calibración de Multímetros el procedimiento EL-001 “*Procedimiento para la calibración de multímetro digitales*” publicado por el CEM es utilizado por siete laboratorios acreditados. Para el caso de las fuentes generadoras de tensión / corriente, el documento EL-010 “*Procedimiento para la calibración de calibradores multifunción*” publicado por el CEM es ampliamente utilizado. El documento LAB-P-15:2017 corresponde a un procedimiento interno validado por un laboratorio de metrología acreditado.

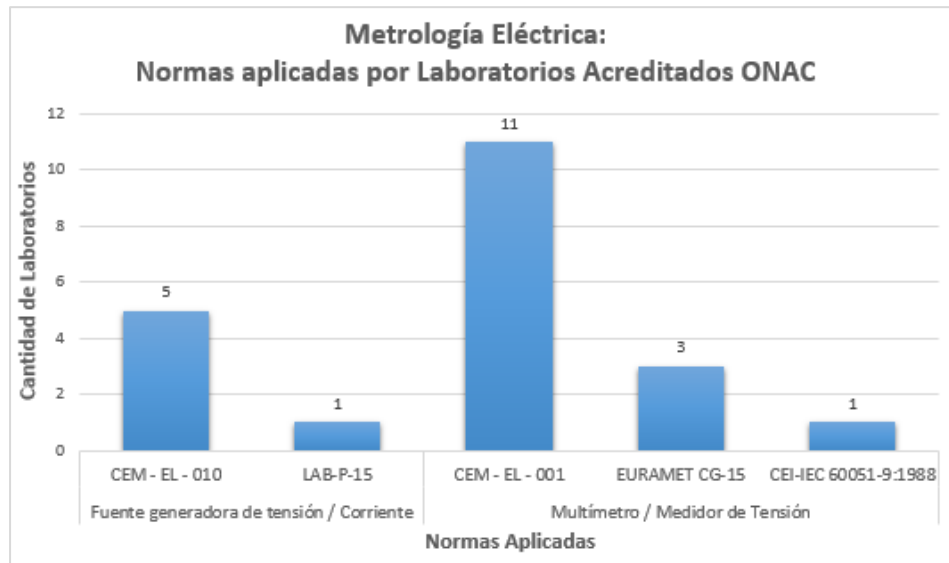


Figura 9 - Metrología eléctrica: Normas Aplicadas

2.2 Metodología estadística para el análisis de sensores de temperatura

Las técnicas estadísticas son herramientas potentes que proporcionan un conjunto de informaciones que facilitan el análisis del comportamiento de un determinado grupo de datos. Por lo anterior, este trabajo de grado, aplica procedimientos estadísticos a un grupo de mediciones de temperatura a fin de analizar el estado metrológico de los termómetros bimetálicos instalados en el motor de combustión interna.

2.3 Mínimos cuadrados ordinarios

Esta herramienta estadística de análisis de regresión es el punto de partida de la evaluación de un definido grupo de mediciones. El método de los mínimos cuadrados es también llamado Ordinary Least Squares Method (OLSM). Por medio del OLSM es posible ajustar los datos medidos por un determinado instrumento en función de las mediciones realizadas por un patrón de medición. La fundamentación teórica del OLSM es presentada en la Tabla 2.

Tabla 1. Fundamentación teórica del método de los mínimos cuadrados.

Paso	Descripción
1	Levantamiento de las mediciones experimentales
2	Aplicar filtro de valores atípicos (análisis de <i>outliers</i>)
3	Graficar las mediciones realizadas por el instrumento a evaluar y el por el patrón de medición
4	Obtener 4 polinomios de ajuste (de grado 1, 2, 3 y 4)
5	Calcular la desviación media cuadrática (s) o incertidumbre de ajuste, para cada polinomio estimado
6	Seleccionar el polinomio de ajuste que presenta el menor valor de s. Dicho polinomio representa el mejor ajuste de los datos.

La literatura recomienda diversas técnicas para análisis de valores atípicos (*outliers*). Entre las técnicas más destacadas tenemos el criterio de Grubbs [10] y el criterio Chauvenet [11]. En particular, este proyecto de grado aplicó el análisis de valores atípicos por medio del criterio de Grubbs. El procedimiento matemático de este método según [12] es:

- Encontrar el parámetro $G_{calculado}$, usando la expresión: $\frac{|x_i - \bar{x}|}{s}$

$x_i = i$ – esima repetición en un dado punto;

\bar{x} = media aritmética de los datos experimentales;

S = desviación estandar

- Para un dado número de repeticiones (n), el criterio Grubbs otorga un parámetro $G_{critico}$.
- Si $G_{calculado} > G_{critico}$ la i-esima medición es descartada, es decir, el valor experimental es considerado un *outliers*.

En relación al cálculo de la desviación media cuadrática (también conocida como incertidumbre de ajuste), la Ecuación 3 proporciona la relación matemática necesaria que debe ser realizada.

$$s = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{[y(x_i) - y_i]^2}{n - m - 1}} \quad (3)$$

En esta expresión:

$y(x_i)$ = valor ajustado, es decir, calculado a través del polinomio de ajuste;

y_i = valor verdadero medido por el patrón de medición;

x_i = valor indicado por el instrumento;

s = desviación media cuadrática;

m = grado del polinomio de ajuste;

n = número de puntos medidos.

2.4 Cálculo de la incertidumbre combinada y expandida

La menor desviación media cuadrática representa una fuente de incertidumbre en los procesos de medición, conocida como incertidumbre de ajuste (u_{ajuste}), pero no es la única. Según la Guía Internacional para la Expresión de Incertidumbre [13], existen otras dos fuentes esenciales de incertidumbre, i.e.: Incertidumbre asociada al patrón de medición (u_p) e incertidumbre asociada a la resolución del instrumento (u_{inst}) a calibrar y evaluar. La relación entre la resolución del instrumento y u_{inst} es dada por la Ecuación 4:

$$u_{inst} = \frac{Resolución}{\sqrt{3}} \quad (4)$$

La incertidumbre combinada (u) es compuesta a partir de la de las tres incertidumbres descritas anteriormente. La Ecuación 5 relaciona estas incertidumbres:

$$u = \sqrt{u_{ajuste}^2 + u_p^2 + u_{ins}^2} \quad (5)$$

Es relevante que la incertidumbre obtenida para un dado proceso de medición genere seguridad en las mediciones, a fin de incrementar la confiabilidad de los resultados, las normas nacionales (ICONTEC) e internacionales (ISO) recomiendan multiplicar la incertidumbre combinada (u) por un factor de cobertura (k). El resultado del producto $u \cdot k$ es definida como la incertidumbre expandida (U).

El factor de cobertura k depende de los grados de libertad (Ψ) de las mediciones hechas (número de puntos n evaluados). La Ecuación 6 muestra la relación entre Ψ y n .

$$\Psi = n - 2 \quad (6)$$

A partir de Ψ y para un nivel de confiabilidad determinado, que en el caso específico de la investigación equivale a 95%, el factor de cobertura k es tabulado en la distribución *t-student*.

2.5 Test de hipótesis t-student

El test de hipótesis *t-student* es una técnica estadística muy utilizada para evaluar el comportamiento de variados procesos en ingeniería, por ejemplo, se puede aplicar dicho test a fin de determinar si la presión generada por dos bombas centrífugas pueden ser considerada iguales, lo cual es un parámetro relevante cuando se desea intercambiar de posición dichas bombas. De esta forma es factible tomar una decisión con mayor seguridad de cambiar o no la bomba.

La fundamentación matemática del test de hipótesis *t-student* según [14] se presenta a continuación:

- I. Determinar el parámetro $t_{\text{calculado}}$, que es dado por la siguiente expresión:

$$t_{\text{calculado}} = \frac{\bar{X} - \bar{Y}}{S_{\bar{X}-\bar{Y}}} \therefore S_{\bar{X}-\bar{Y}} = \sqrt{\frac{SS_X + SS_Y}{n(n-1)}}; \quad (7)$$

$$SS_X = \sum (x_i - \bar{x})^2 \quad (8)$$

$$SS_Y = \sum (y_i - \bar{y})^2 \quad (9)$$

En estas expresiones:

\bar{X} : Media aritmetica de las mediciones realizadas en un dado punto con el termometro X

\bar{Y} : Media aritmetica de las mediciones realizadas en un dado punto con el termometro Y

- II. Encontrar el t_{critico} en función de los grados de libertad (φ) para este test, donde φ es dado por:

$$\varphi = (n - 1) + (n - 1)$$

- III. Si $t_{\text{calculado}} > t_{\text{critico}}$, las mediciones de los termómetros comparados no pueden ser considerados estadísticamente iguales para un grado de confiabilidad definido. En este trabajo de grado el grado de confiabilidad de los procedimientos estadísticos aplicados es del 95%.

En relación a este proyecto de grado, este test de hipótesis fue utilizado a fin de determinar si dos termómetros bimetálicos con características idénticas, presentaban resultados estadísticamente iguales. Las condiciones comunes necesarias para poder aplicar el test entre los dos termómetros son: i) El rango de medición debe ser el mismo para los dos termómetros; ii) Los puntos evaluados entre los dos termómetros deben coincidir.

3. Influencia de la curva de calibración analítica en la confiabilidad metrológica de un ciclo Otto

A seguir se presenta la metodología experimental aplicada en el desarrollo del proyecto grado. Posteriormente se presenta la solución de cada uno de los objetivos específicos originalmente formulados:



Figura 10 – Área de ensayo del motor de combustión interna

El modelo aquí presentado está basado en un balance energético de la cámara de combustión del motor. Donde se presentan las suposiciones y ecuaciones utilizadas en su desarrollo, en la experiencia de laboratorio.

- Calor de entrada

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T \rightarrow \frac{Q}{m} = Q = c \cdot \Delta T$$

$$Q_{in} = c_v \cdot (\Delta T) \rightarrow \text{calor de entrada}$$

$$Q_{out} = c_v \cdot (\Delta T) \rightarrow \text{calor de salida}$$

$$\text{Donde } c_v = 0.72 \text{ KJ}/\text{Kg} \cdot \text{K}$$

- Relación de compresión

$$r_p = \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{1}{\gamma-1}}$$

$$\gamma = 1.4$$

- Eficiencia térmica

$$\eta_T = \frac{Q_{in} \cdot Q_{out}}{Q_{in}} = \frac{Q_{in}}{Q_{in}} - \frac{Q_{out}}{Q_{in}}$$

$$\eta_T = 1 - \frac{Q_{out}}{Q_{in}}$$

- Presión y volumen

$$P_1 \rightarrow P_{atm}$$

$$V_1 = \frac{m \cdot c_v \cdot T_1}{P_1}$$

$$V_2 = \frac{m \cdot c_v \cdot T_2}{P_2}$$

$$V_3 = \frac{m \cdot c_v \cdot T_3}{P_3}$$

$$V_4 = \frac{m \cdot c_v \cdot T_4}{P_4}$$

Para hallar las presiones P_2, P_3, P_4 despejamos de la siguiente ecuación

$$V_x = \frac{m \cdot c_v \cdot T_x}{P_x}$$

$$V_1 = V_4$$

$$V_2 = V_3$$

Para hallar el V_2 debemos tener en cuenta las dimensiones en el cilindro del motor de combustión utilizado YAMAHA EF2600D



Figura 11 – Características del motor de combustión interna

Cilindro del motor donde:

$$V = S \cdot C = \pi \cdot C \cdot r^2 \rightarrow [\pi \cdot C \cdot (d^2/4)]$$

$C =$ carrera del cilindro = 80mm

$S =$ superficie del cilindro = $\pi \cdot r^2$

$d =$ diametro del piston 50mm

3.1 Calibración de los sensores de temperatura

Para atender este objetivo específico, esta sección presenta el resultado de la calibración de los sensores de temperatura conectados al motor de combustión interna. La siguiente tabla presenta los datos experimentales.

Tabla 2 – Datos experimentales

No Puntos	Hora	Temperaturas indicadas por los sensores						Temperatura del Patrón de Medición			
		REF	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆	Medida 1	Medida 2	Valor medio	Desviación
	h:min:s	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C
1	03:56:09 p. m.	20,0	19,8	23,0	25,0	18,5	17,0	19,9	20,2	20,1	0,2121
2	04:00:00 p. m.	30,0	29,8	33,0	35,0	28,5	27,0	29,9	30,2	30,1	0,2121
3	04:09:40 p. m.	40,0	39,8	43,0	45,0	38,5	37,0	39,9	40,2	40,1	0,2121
4	11:07:04 a. m.	50,0	49,8	53,0	55,0	48,5	47,0	49,9	50,2	50,1	0,2121
5	04:16:50 p. m.	60,0	59,8	63,0	65,0	58,5	57,0	59,9	60,2	60,1	0,2121
6	11:13:28 a. m.	70,0	69,8	73,0	75,0	68,5	67,0	69,9	70,2	70,1	0,2121
7	11:18:05 a. m.	80,0	79,8	83,0	85,0	78,5	77,0	79,9	80,2	80,1	0,2121
8	04:23:58 p. m.	90,0	89,8	93,0	95,0	88,5	87,0	89,9	90,2	90,1	0,2121
9	04:30:36 p. m.	100,0	99,8	103,0	105,0	98,5	97,0	99,9	100,2	100,1	0,2121
10	04:39:35 p. m.	110,0	109,8	113,0	115,0	108,5	107,0	109,9	110,2	110,1	0,2121
11	11:26:20 a. m.	120,0	119,8	123,0	125,0	118,5	117,0	119,9	120,2	120,1	0,2121
12	04:43:51 p. m.	130,0	129,8	133,0	135,0	128,5	127,0	129,9	130,2	130,1	0,2121
13	04:50:09 p. m.	140,0	139,8	143,0	145,0	138,5	137,0	139,9	140,2	140,1	0,2121
14	11:46:10 a. m.	150,0	149,8	153,0	155,0	148,5	147,0	149,9	150,2	150,1	0,2121
15	11:56:35 a. m.	160,0	159,8	163,0	165,0	158,5	157,0	159,9	160,2	160,1	0,2121
16	04:54:47 p. m.	170,0	169,8	173,0	175,0	168,5	167,0	169,9	170,2	170,1	0,2121
17	12:09:01 p. m.	180,0	179,8	183,0	185,0	178,5	177,0	179,9	180,2	180,1	0,2121
18	12:17:00 p. m.	190,0	189,8	193,0	195,0	188,5	187,0	189,9	190,2	190,1	0,2121
19	12:26:14 p. m.	200,0	199,8	203,0	205,0	198,5	197,0	199,9	200,2	200,1	0,2121
20	12:31:09 p. m.	210,0	209,8	213,0	215,0	208,5	207,0	209,9	210,2	210,1	0,2121
21	05:07:31 p. m.	220,0	219,8	223,0	225,0	218,5	217,0	219,9	220,2	220,1	0,2121
22	12:51:25 p. m.	230,0	229,8	233,0	235,0	228,5	227,0	229,9	230,2	230,1	0,2121
23	01:02:10 p. m.	240,0	239,8	243,0	245,0	238,5	237,0	239,9	240,2	240,1	0,2121
24	05:20:20 p. m.	250,0	249,8	253,0	255,0	248,5	247,0	249,9	250,2	250,1	0,2121
25	01:15:39 p. m.	260,0	259,8	263,0	265,0	258,5	257,0	259,9	260,2	260,1	0,2121
26	01:19:14 p. m.	270,0	269,8	273,0	275,0	268,5	267,0	269,9	270,2	270,1	0,2121
27	05:32:31 p. m.	280,0	279,8	283,0	285,0	278,5	277,0	279,9	280,2	280,1	0,2121
28	01:23:44 p. m.	290,0	289,8	293,0	295,0	288,5	287,0	289,9	290,2	290,1	0,2121
29	01:29:12 p. m.	300,0	299,8	303,0	305,0	298,5	297,0	299,9	300,2	300,1	0,2121
30	01:34:38 p. m.	310,0	309,8	313,0	315,0	308,5	307,0	309,9	310,2	310,1	0,2121

Fuente: Autores

Aplicando el método los mínimos cuadrados ordinarios fue posible determinar el polinomio de mejor ajuste para cada uno de los sensores de temperatura. Este polinomio pertenece a cada uno de los sensores y fue posible obtenerlo con el auxilio de las herramientas de Excel.

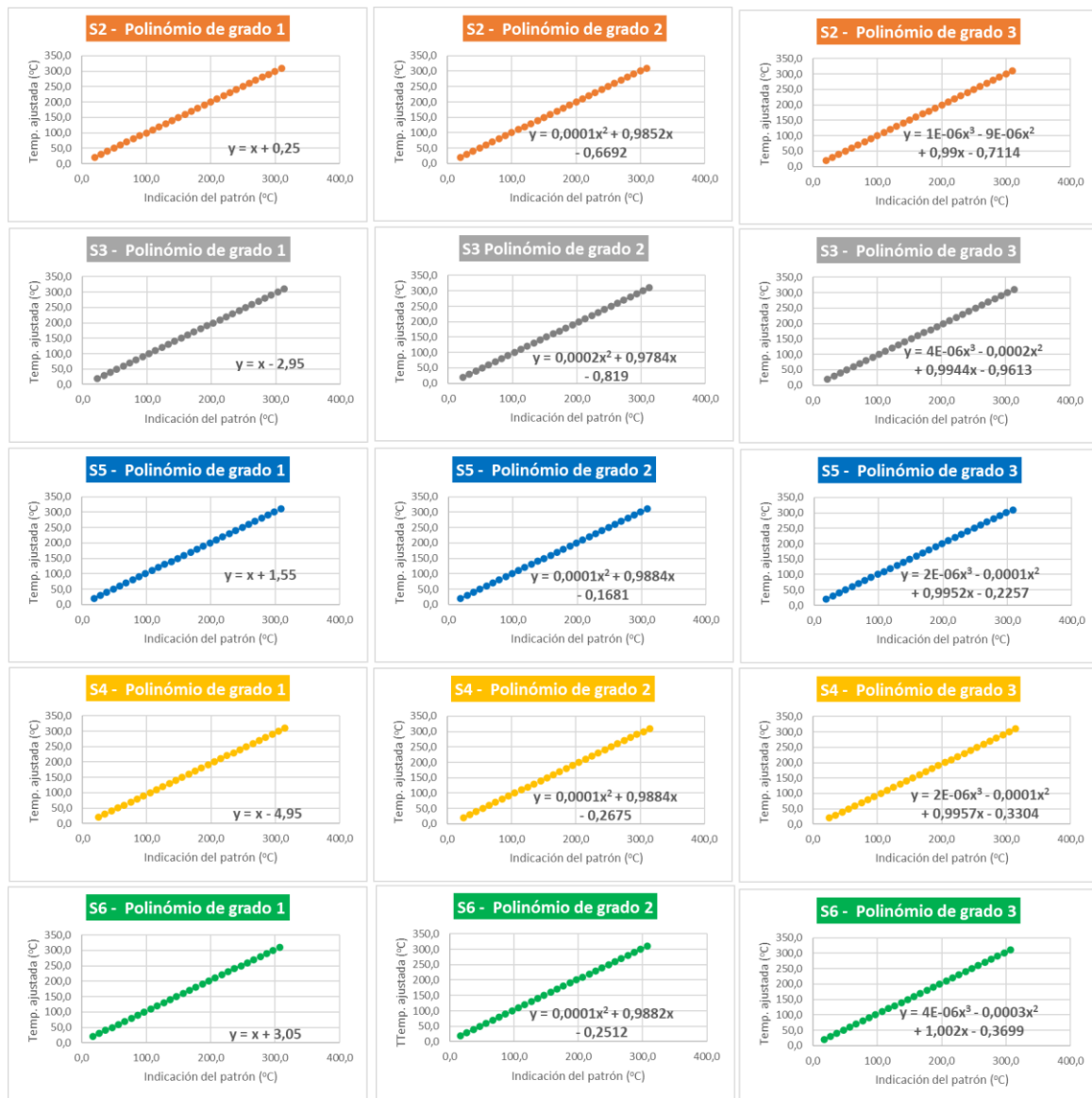


Figura 12 – Polinomios de ajuste

Fuente: Autores

La tabla a seguir presenta los coeficientes de los polinomios de ajuste:

Tabla 4 – Coeficientes de los polinomios

Grau	Coef.	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆
		S1	S2	S3	S4	S5	S6
1	a	-	1	1	1	1	1
	b	-	0,25	-2,95	-4,95	1,55	3,05
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	0,000002	0,000002	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	-	-0,07114	-0,9613	-0,3304	-0,2257	-0,3699

Fuente: Autores

Luego, se calculó la temperatura ajustada para cada sensor de temperatura aplicando los polinomios de ajustes anteriormente obtenidos.

Tabla 5 – Temperatura ajustada

Polinomio de grado 1						Polinomio de grado 2						Polinomio de grado 3					
T ₁	T ₂	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
S1	S2	S3	S4	S5	S6	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S1	S2	S3	S4	S5	S6
-	20,1	20,1	20,1	20,1	20,1	-	18,9	21,8	24,5	18,2	16,6	-	19,5	21,9	24,5	18,2	16,6
-	30,1	30,1	30,1	30,1	30,1	-	28,8	31,7	34,4	28,1	26,5	-	29,4	31,8	34,5	28,1	26,5
-	40,1	40,1	40,1	40,1	40,1	-	38,7	41,6	44,4	38,0	36,4	-	39,4	41,7	44,5	38,1	36,5
-	50,1	50,1	50,1	50,1	50,1	-	48,6	51,6	54,4	48,0	46,4	-	49,3	51,8	54,5	48,0	46,5
-	60,1	60,1	60,1	60,1	60,1	-	58,6	61,6	64,4	58,0	56,4	-	59,3	61,9	64,5	58,1	56,5
-	70,1	70,1	70,1	70,1	70,1	-	68,6	71,7	74,4	68,0	66,4	-	69,3	72,1	74,6	68,1	66,6
-	80,1	80,1	80,1	80,1	80,1	-	78,6	81,8	84,5	78,0	76,4	-	79,4	82,5	84,8	78,2	76,8
-	90,1	90,1	90,1	90,1	90,1	-	88,6	91,9	94,5	88,1	86,5	-	89,5	93,0	95,1	88,5	87,2
-	100,1	100,1	100,1	100,1	100,1	-	98,6	102,1	104,6	98,2	96,5	-	99,6	103,7	105,4	98,7	97,7
-	110,1	110,1	110,1	110,1	110,1	-	108,7	112,3	114,7	108,3	106,6	-	109,8	114,6	115,9	109,1	108,3
-	120,1	120,1	120,1	120,1	120,1	-	118,8	122,6	124,8	118,4	116,7	-	120,1	125,8	126,5	119,6	119,2
-	130,1	130,1	130,1	130,1	130,1	-	128,9	132,8	135,0	128,5	126,9	-	130,5	137,2	137,2	130,2	130,2
-	140,1	140,1	140,1	140,1	140,1	-	139,0	143,2	145,2	138,6	137,0	-	140,9	148,8	148,0	141,0	141,6
-	150,1	150,1	150,1	150,1	150,1	-	149,2	153,6	155,3	148,8	147,2	-	151,4	160,8	159,0	151,9	153,1
-	160,1	160,1	160,1	160,1	160,1	-	159,3	164,0	165,5	159,0	157,4	-	162,0	173,1	170,2	163,0	165,0
-	170,1	170,1	170,1	170,1	170,1	-	169,5	174,4	175,8	169,2	167,6	-	172,7	185,8	181,6	174,2	177,2
-	180,1	180,1	180,1	180,1	180,1	-	179,7	184,9	186,0	179,4	177,8	-	183,5	198,8	193,1	185,6	189,8

-	190,1	190,1	190,1	190,1	190,1	-	189,9	195,5	196,3	189,7	188,0	-	194,3	212,3	204,9	197,2	202,7
-	200,1	200,1	200,1	200,1	200,1	-	200,2	206,0	206,6	200,0	198,3	-	205,3	226,1	216,8	209,0	216,0
-	210,1	210,1	210,1	210,1	210,1	-	210,4	216,7	216,9	210,3	208,6	-	216,5	240,4	229,0	221,1	229,7
-	220,1	220,1	220,1	220,1	220,1	-	220,7	227,3	227,2	220,6	218,9	-	227,7	255,2	241,4	233,3	243,8
-	230,1	230,1	230,1	230,1	230,1	-	231,0	238,0	237,5	230,9	229,2	-	239,1	270,5	254,1	245,8	258,4
-	240,1	240,1	240,1	240,1	240,1	-	241,3	248,7	247,9	241,3	239,6	-	250,6	286,3	267,0	258,6	273,5
-	250,1	250,1	250,1	250,1	250,1	-	251,7	259,5	258,3	251,6	249,9	-	262,3	302,6	280,2	271,6	289,1
-	260,1	260,1	260,1	260,1	260,1	-	262,0	270,3	268,7	262,0	260,3	-	274,1	319,5	293,7	284,9	305,2
-	270,1	270,1	270,1	270,1	270,1	-	272,4	281,2	279,1	272,4	270,7	-	286,0	337,0	307,5	298,5	321,9
-	280,1	280,1	280,1	280,1	280,1	-	282,8	292,1	289,5	282,9	281,2	-	298,1	355,1	321,6	312,4	339,2
-	290,1	290,1	290,1	290,1	290,1	-	293,2	303,0	300,0	293,3	291,6	-	310,4	373,8	336,0	326,6	357,1
-	300,1	300,1	300,1	300,1	300,1	-	303,7	314,0	310,5	303,8	302,1	-	322,9	393,3	350,8	341,1	375,6
-	310,1	310,1	310,1	310,1	310,1	-	314,1	325,0	321,0	314,3	312,6	-	335,5	413,3	365,9	356,0	394,7

Fuente: Autores

El error cuadrático es obtenido y consolidado en la siguiente tabla:

Tabla 6 – Determinación del error cuadrático

Polinomio de grado 1						Polinomio de grado 2						Polinomio de grado 3					
E ₁	E ₂	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
S1	S2	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	(°C) ²	(°C) ²
-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	-	1,3760	3,0276	19,8470	3,6042	12,0610	-	0,2651	3,2500	20,0780	3,5572	11,9228
-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	-	1,6165	2,6765	19,3512	3,8710	12,5805	-	0,3608	2,9924	19,6457	3,7925	12,2911
-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	-	1,8221	2,4712	19,0358	4,0662	12,9665	-	0,4494	2,8769	19,4115	3,9784	12,6308
-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	-	1,9831	2,3963	18,8964	4,1840	13,2125	-	0,5155	2,9777	19,4777	4,0625	12,7685
-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	-	2,0928	2,4461	18,9312	4,2209	13,3145	-	0,5439	3,3940	19,9527	3,9933	12,5304
-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	-	2,1463	2,6244	19,1406	4,1758	13,2707	-	0,5226	4,2856	20,9613	3,7283	11,7618
-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	-	2,1416	2,9447	19,5276	4,0501	13,0820	-	0,4466	5,9207	22,6562	3,2445	10,3585
-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	-	2,0789	3,4299	20,0973	3,8474	12,7513	-	0,3221	8,7351	25,2340	2,5517	8,3093
-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	-	1,9607	4,1128	20,8575	3,5739	12,2843	-	0,1720	13,4030	28,9535	1,7092	5,7500
-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	-	1,7919	5,0355	21,8182	3,2381	11,6889	-	0,0416	20,9186	34,1564	0,8448	3,0291
-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	-	1,5801	6,2500	22,9920	2,8509	10,9753	-	0,0051	32,6906	41,2915	0,1770	0,7853
-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	-	1,3350	7,8176	24,3937	2,4257	10,1563	-	0,1731	50,6467	50,9418	0,0400	0,0357
-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	-	1,0688	9,8094	26,0406	1,9782	9,2471	-	0,7009	77,3508	63,8537	0,9116	2,2765
-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	-	0,7961	12,3061	27,9524	1,5264	8,2651	-	1,7967	116,1310	80,9703	3,4440	9,5945
-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	-	0,5338	15,3978	30,1511	1,0909	7,2302	-	3,7314	171,2195	103,4665	8,4974	24,7902
-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	-	0,3014	19,1844	32,6612	0,6947	6,1648	-	6,8490	247,9040	132,7876	17,1766	51,5129
-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	-	0,1207	23,7754	35,5097	0,3630	5,0936	-	11,5769	352,6902	170,6903	30,8702	94,4071
-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	-	0,0158	29,2897	38,7257	0,1235	4,0437	-	18,4385	493,4764	219,2872	51,2933	159,2698
-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	-	0,0134	35,8561	42,3410	0,0065	3,0447	-	28,0646	679,7392	281,0937	80,5321	253,2201
-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	-	0,1424	43,6128	46,3897	0,0443	2,1284	-	41,2072	922,7310	359,0779	121,0925	384,8805
-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	-	0,4342	52,7076	50,9082	0,2720	1,3292	-	58,7528	1235,6890	456,7132	175,9506	564,5686
-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	-	0,9227	63,2979	55,9354	0,7268	0,6838	-	81,7374	1634,0551	578,0346	248,6069	804,5013
-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	-	1,6439	75,5509	61,5126	1,4485	0,2313	-	111,3614	2135,7087	727,6965	343,1426	1119,0103
-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	-	2,6366	89,6430	67,6835	2,4791	0,0132	-	149,0057	2761,2091	911,0346	464,2794	1524,7691
-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	-	3,9417	105,7607	74,4942	3,8633	0,0735	-	196,2483	3534,0514	1134,1302	617,4419	2041,0311
-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	-	5,6025	124,0996	81,9930	5,6479	0,4585	-	254,8820	4480,9325	1403,8773	808,8230	2689,8799
-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	-	7,6649	144,8653	90,2310	7,8822	1,2168	-	326,9320	5632,0294	1728,0524	1045,4519	3496,4908
-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	-	10,1771	168,2728	99,2614	10,6180	2,3997	-	414,6753	7021,2883	2115,3882	1335,2654	4489,4036
-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	-	13,1897	194,5467	109,1398	13,9094	4,0606	-	520,6600	8686,7261	2575,6488	1687,1818	5700,8075
-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	-	16,7556	223,9213	119,9244	17,8128	6,2555	-	647,7255	10670,7429	3119,7084	2111,1776	7166,8368

Fuente: Autores

La incertidumbre del ajuste para cada uno de los polinomios es calculada. De esta manera es posible determinar el polinomio que menos incertidumbre de agrega a cada uno de los polinomios. Esto ha sido consolidado en la siguiente tabla.

Tabla 7 – Incertidumbre de ajuste

Incertidumbre del Ajuste					
T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆
S1	S2	S3	S4	S5	S6
°C	°C	°C	°C	°C	°C
-	Grado 1	Grado 1	Grado 1	Grado 1	Grado 1
-	2,71E-14	2,71E-14	2,71E-14	2,71E-14	2,71E-14

Fuente: Autores

Tabla 8 – Componentes de la incertidumbre expandida

Análisis de Incertidumbre																			
Resolución del Instrumento						Inc. del patrón	Incertidumbre de Ajuste						Incertidumbre Expandida						
T ₁	T ₂	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	
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	
-	0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,1	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	-	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
-	0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,1	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	-	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
-	0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,1	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	-	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
-	0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,1	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	-	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
-	0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,1	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	-	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
-	0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,1	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	-	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
-	0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,1	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	-	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
-	0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,1	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	-	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
-	0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,1	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	-	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
-	0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,1	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	-	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
-	0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,1	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	-	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
-	0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,1	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	-	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
-	0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,1	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	-	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
-	0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,1	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	-	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
-	0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,1	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	-	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
-	0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,1	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	-	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
-	0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,1	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	-	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
-	0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,1	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	-	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
-	0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,1	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	-	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10

Fuente: Autores

Posteriormente, con la temperatura ajustada, es posible determinar el error sistemático ajustado. Es decir, la diferencia entre la temperatura ajustada y la temperatura del patrón de medición. Estos resultados son consolidados en la siguiente tabla:

Tabla 9 – Error sistemático ajustado

Temperatura Ajustada							Error sistemático					
T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆	Patrón	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆
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
-	20,1	20,1	20,1	20,1	20,1	20,1	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-	30,1	30,1	30,1	30,1	30,1	30,1	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-	40,1	40,1	40,1	40,1	40,1	40,1	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-	50,1	50,1	50,1	50,1	50,1	50,1	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-	60,1	60,1	60,1	60,1	60,1	60,1	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-	70,1	70,1	70,1	70,1	70,1	70,1	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-	80,1	80,1	80,1	80,1	80,1	80,1	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-	90,1	90,1	90,1	90,1	90,1	90,1	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-	100,1	100,1	100,1	100,1	100,1	100,1	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-	110,1	110,1	110,1	110,1	110,1	110,1	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-	120,1	120,1	120,1	120,1	120,1	120,1	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-	130,1	130,1	130,1	130,1	130,1	130,1	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-	140,1	140,1	140,1	140,1	140,1	140,1	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-	150,1	150,1	150,1	150,1	150,1	150,1	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-	160,1	160,1	160,1	160,1	160,1	160,1	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-	170,1	170,1	170,1	170,1	170,1	170,1	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-	180,1	180,1	180,1	180,1	180,1	180,1	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-	190,1	190,1	190,1	190,1	190,1	190,1	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-	200,1	200,1	200,1	200,1	200,1	200,1	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-	210,1	210,1	210,1	210,1	210,1	210,1	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-	220,1	220,1	220,1	220,1	220,1	220,1	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-	230,1	230,1	230,1	230,1	230,1	230,1	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-	240,1	240,1	240,1	240,1	240,1	240,1	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-	250,1	250,1	250,1	250,1	250,1	250,1	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-	260,1	260,1	260,1	260,1	260,1	260,1	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-	270,1	270,1	270,1	270,1	270,1	270,1	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-	280,1	280,1	280,1	280,1	280,1	280,1	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-	290,1	290,1	290,1	290,1	290,1	290,1	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-	300,1	300,1	300,1	300,1	300,1	300,1	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-	310,1	310,1	310,1	310,1	310,1	310,1	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Fuente: Autores

Finalmente, es posible determinar el error total, es decir, la suma del error sistemático con la incertidumbre expandida. Tomando el sensor S1 como ejemplo, los errores no ajustados que van desde 0.9 °C a 1.3 °C se han reducido a un nivel que no excede ± 0.18 °C , resultado del ajuste que se aplica a los 6 sensores.

La Figura a seguir consolida los resultados obtenidos:

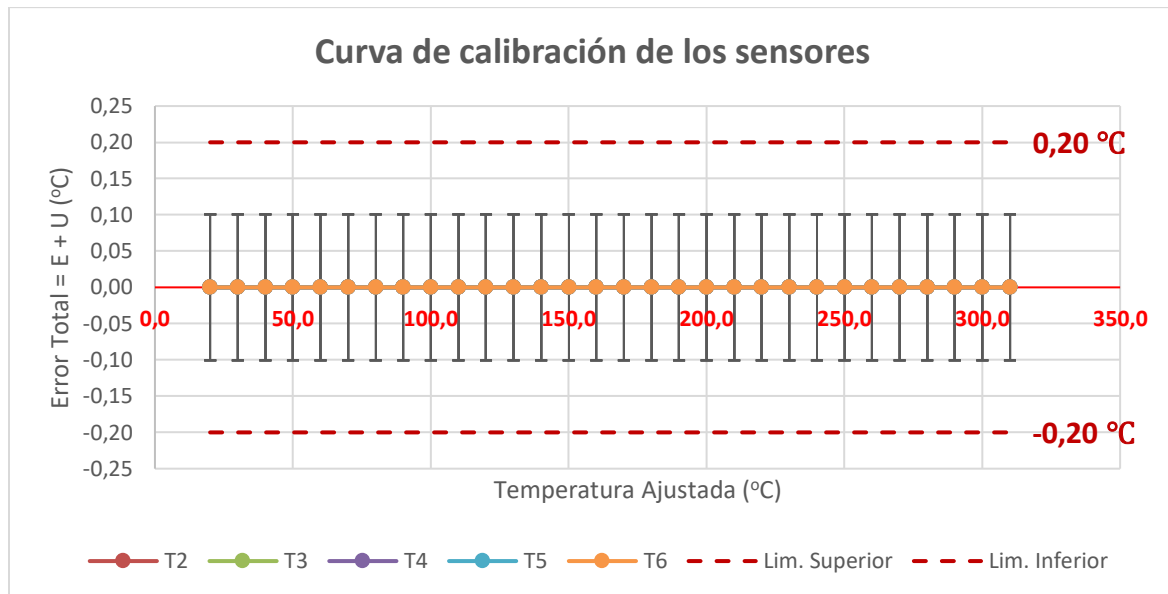


Figura 13 – Resultados consolidados
Fuente: Autores

3.2 Eficiencia térmica del ciclo Otto

Un procedimiento analítico muy utilizado en análisis cuantitativo es el llamado de calibración que implica la construcción de una “curva de calibración”. Una curva de calibración es la representación gráfica de una señal que se mide en función de una o más variables. A seguir se presenta el cálculo de la eficiencia térmica del motor de combustión interna a partir de la corrección de temperatura de los 3 métodos propuestos:

3.2.1 Método #1: medición directa de temperatura (sin corregir)

A partir de los siguientes datos experimentales fue posible realizar toda la parte analítica del proyecto. La siguiente tabla consolida los resultados experimentales obtenidos en el laboratorio:

Tabla 10 – 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	3630	3622	8	680	11,76	48	270	115	32	50
60		3622	3614	8	680	11,76	48	278	115	32	51
60		3614	3604	10	680	14,71	47	282	115	32	52
60		3604	3593	11	680	16,18	49	286	115	32	52
60	2500	3593	3584	9	680	13,24	48	291	116	32	52
60		3584	3576	8	680	11,76	50	291	116	32	52
60		3576	3569	7	680	10,29	49	290	116	32	52
60		3569	3563	6	680	8,82	49	291	116	32	52
60	3000	3563	3558	5	680	7,35	50	291	118	32	52
60		3558	3550	8	680	11,76	50	290	118	32	52
60		3550	3541	9	680	13,24	50	290	118	32	52
60		3541	3531	10	680	14,71	49	291	118	32	52
60	3400	3531	3522	9	680	13,24	50	293	118	32	51
60		3522	3513	9	680	13,24	50	293	118	32	51
60		3513	3504	9	680	13,24	50	293	118	32	51
60		3504	3496	8	680	11,76	51	290	118	32	51

La tabla anterior presenta el consumo de combustible en volumen y en masa. Además, consolida la medición de temperatura en cada uno de los estados del ciclo Otto.

En relación al consumo de combustible la siguiente tabla presenta que el mayor consumo se da cuando el motor opera a 3000 RPM. La figura siguiente confirma este comportamiento.

Tabla 11 – Consumo específico y volumétrico de combustible

RPM	Mi - Mf (g) (promedio)	Mi - Mf (g) (Incertidumbre)	Volumen Consumido (ml) (promedio)	Volumen Consumido (ml) (Incertidumbre)
2000	9,25	0,75	13,60	1,10
2500	7,50	0,65	11,03	0,95
3000	8,00	1,08	11,76	1,59
3400	8,75	0,25	12,87	0,37

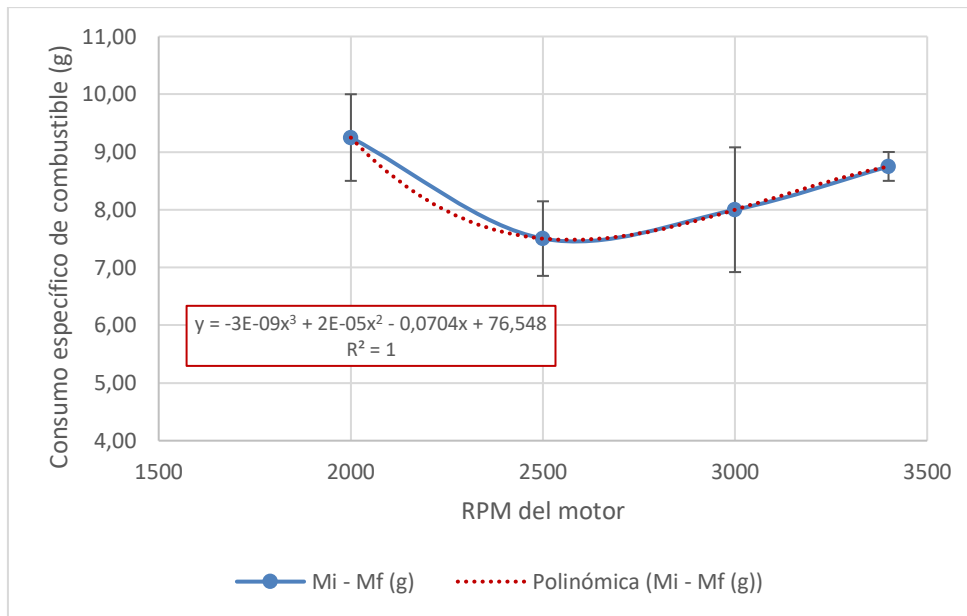


Figura 14 – Consumo específico de combustible

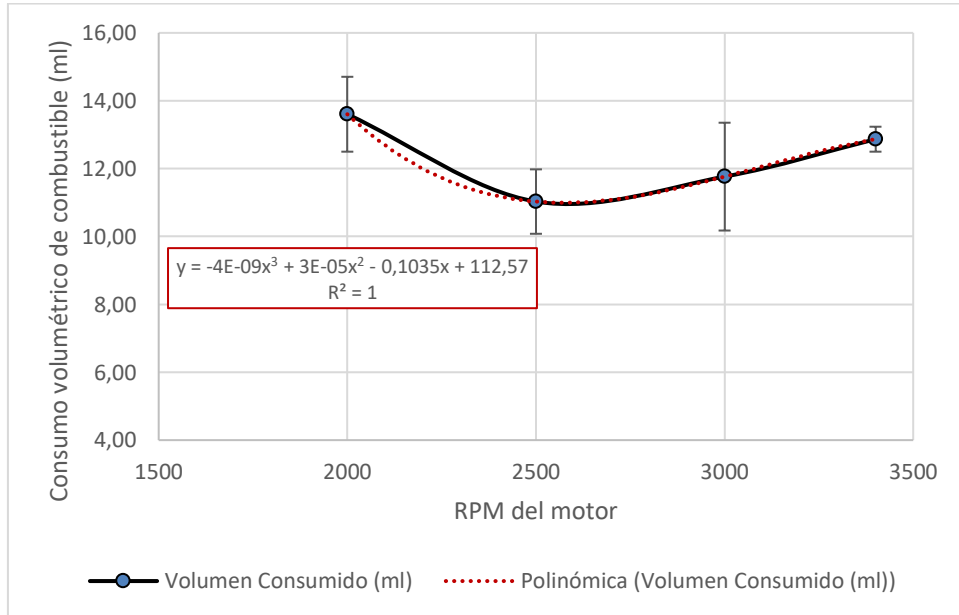


Figura 15 – Consumo volumétrico de combustible

Por otro lado, durante los procesos de entrada y salida de calor se da, respectivamente, en la combustión y el escape, se realizó el cálculo en función de cada una de las revoluciones evaluadas. La siguiente tabla y la figura confirman los resultados.

Tabla 12 – Calor de entrada (Q_{in}), calor de salida (Q_{out})

RPM	Q_{in}	Q_{out}	$Q_{in} - Q_{out}$
2000	166,32	62,64	103,68
2500	174,06	63,36	110,70
3000	173,34	64,80	108,54
3400	174,24	64,80	109,44

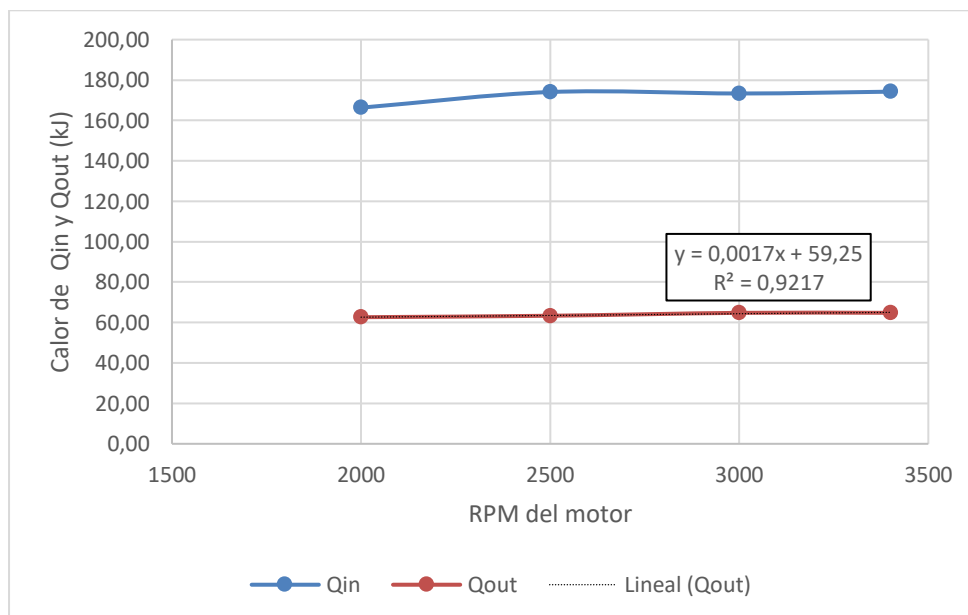


Figura 16 – Calor de entrada al proceso (Q_{in}) y calor perdido en el proceso (Q_{out})

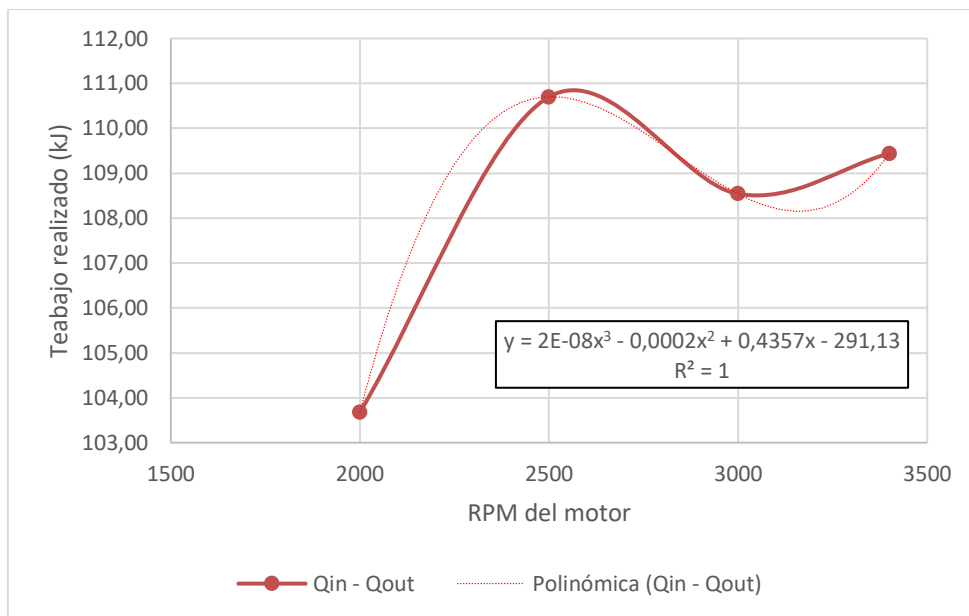


Figura 17 – Trabajo realizado

Finalmente, la eficiencia térmica del motor se calculó para cada una de las revoluciones evaluadas. Recordando que **para este caso no hubo corrección de la temperatura** medida en cada uno de los puntos experimentales. La siguiente figura confirma que la máxima eficiencia del motor equivale a 63.6% en 2500 RPM.

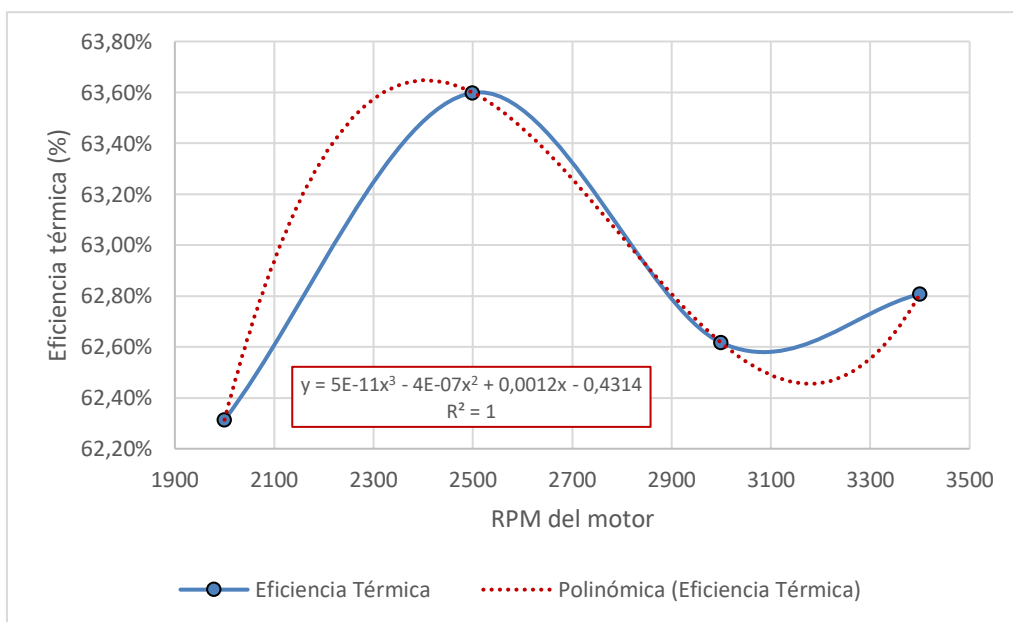


Figura 18 – Eficiencia térmica y ecuación de rendimiento

A seguir se explica el mismo procedimiento pero para la situación donde la temperatura medida es corregida a partir de un polinomio interpolador de ajuste.

3.2.2 Método #2: utilizando un polinomio interpolador para corregir el valor de la temperatura

A partir de los siguientes datos experimentales fue posible realizar toda la parte analítica del proyecto. La siguiente tabla consolida los resultados experimentales obtenidos en el laboratorio:

Tabla 13 – Datos experimentales

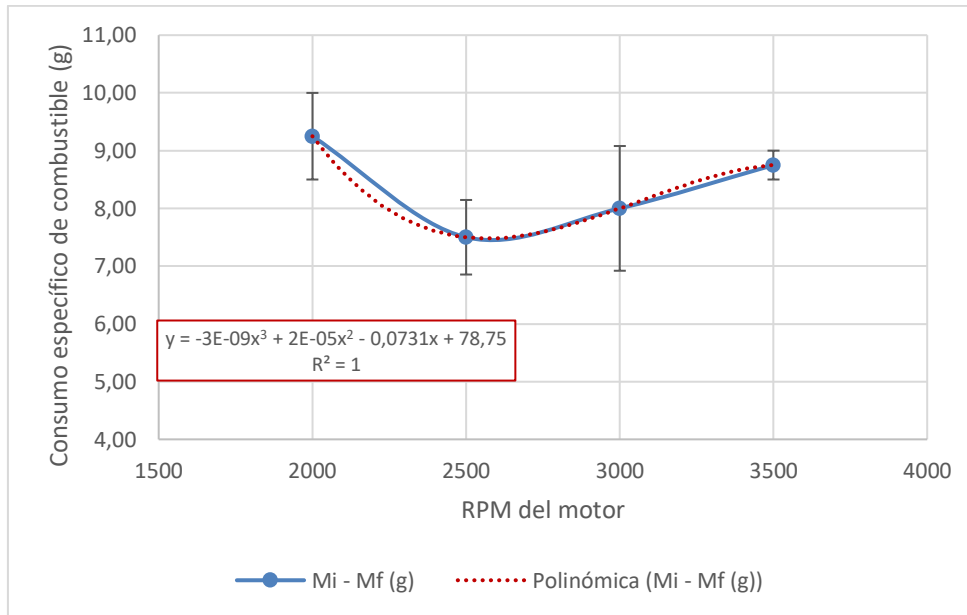
Tiempo (s)	RPM	Masa inicial, Mi (g)	Masa Final, Mf (g)	Mi - Mf (g)	Densidad Gasolina (g/l)	Volumen Consumido (ml)	T2	T3	T4	T5	T6
60	2000	3630	3622	8	680	11,76	48	270	115	32	50
60		3622	3614	8	680	11,76	48	278	115	32	51
60		3614	3604	10	680	14,71	47	282	115	32	52
60		3604	3593	11	680	16,18	49	286	115	32	52
60	2500	3593	3584	9	680	13,24	48	291	116	32	52
60		3584	3576	8	680	11,76	50	291	116	32	52
60		3576	3569	7	680	10,29	49	290	116	32	52
60		3569	3563	6	680	8,82	49	291	116	32	52
60	3000	3563	3558	5	680	7,35	50	291	118	32	52
60		3558	3550	8	680	11,76	50	290	118	32	52
60		3550	3541	9	680	13,24	50	290	118	32	52
60		3541	3531	10	680	14,71	49	291	118	32	52
60	3400	3531	3522	9	680	13,24	50	293	118	32	51
60		3522	3513	9	680	13,24	50	293	118	32	51
60		3513	3504	9	680	13,24	50	293	118	32	51
60		3504	3496	8	680	11,76	51	290	118	32	51

La tabla anterior presenta el consumo de combustible en volumen y en masa. Además, consolida la medición de temperatura en cada uno de los estados del ciclo Otto.

En relación al consumo de combustible la siguiente tabla presenta que el mayor consumo se da cuando el motor opera a 3000 RPM. La figura siguiente confirma este comportamiento.

Tabla 14 – Consumo específico y volumétrico de combustible

RPM	Mi - Mf (g) (promedio)	Mi - Mf (g) (Incertidumbre)	Volumen Consumido (ml) (promedio)	Volumen Consumido (ml) (Incertidumbre)
2000	9,25	0,75	13,60	1,10
2500	7,50	0,65	11,03	0,95
3000	8,00	1,08	11,76	1,59
3400	8,75	0,25	12,87	0,37

**Figura 19** – Consumo específico de combustible

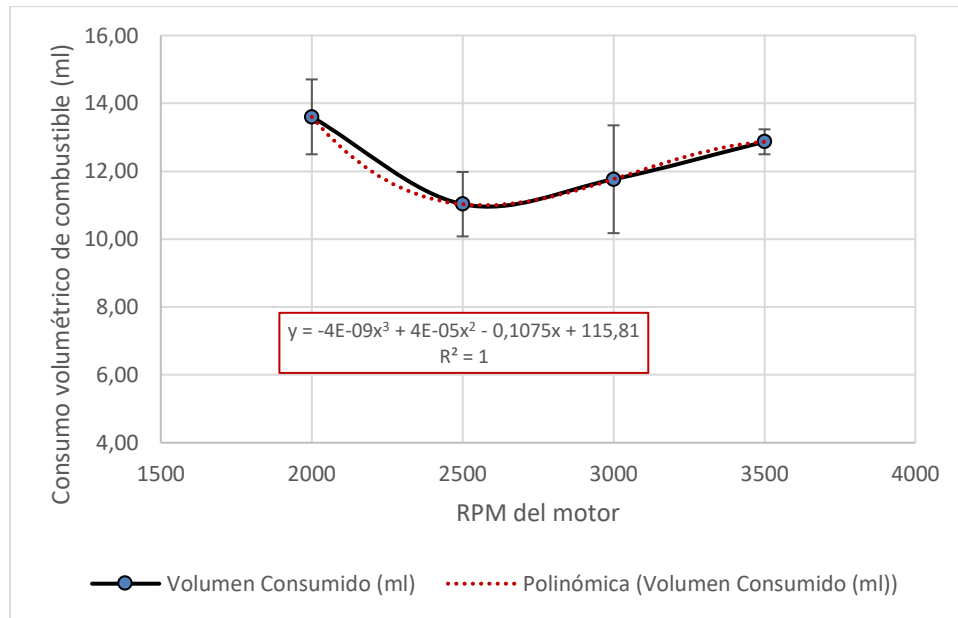


Figura 20 – Consumo volumétrico de combustible

Por otro lado, durante los procesos de entrada y salida de calor se da, respectivamente, en la combustión y el escape, se realizó el cálculo en función de cada una de las revoluciones evaluadas. La siguiente tabla y la figura confirman los resultados.

Tabla 15 – Calor de entrada (Qin), calor de salida (Qout)

RPM	Qin	Qout	Qin - Qout
2000	164,02	58,00	106,02
2500	171,76	55,84	115,92
3000	171,04	54,40	116,64
3500	171,94	51,52	120,42

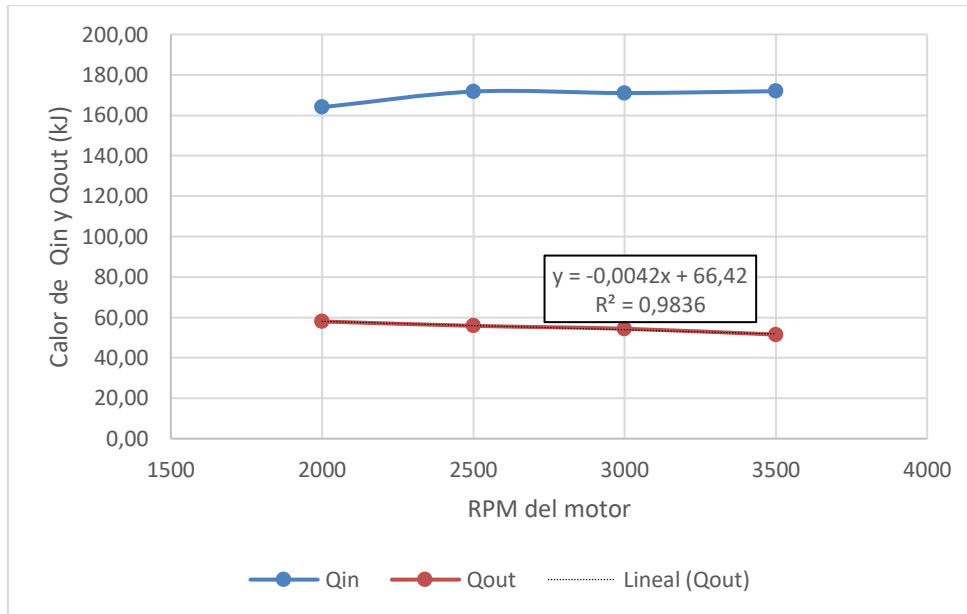


Figura 21 – Calor de entrada al proceso (Q_{in}) y calor perdido en el proceso (Q_{out})

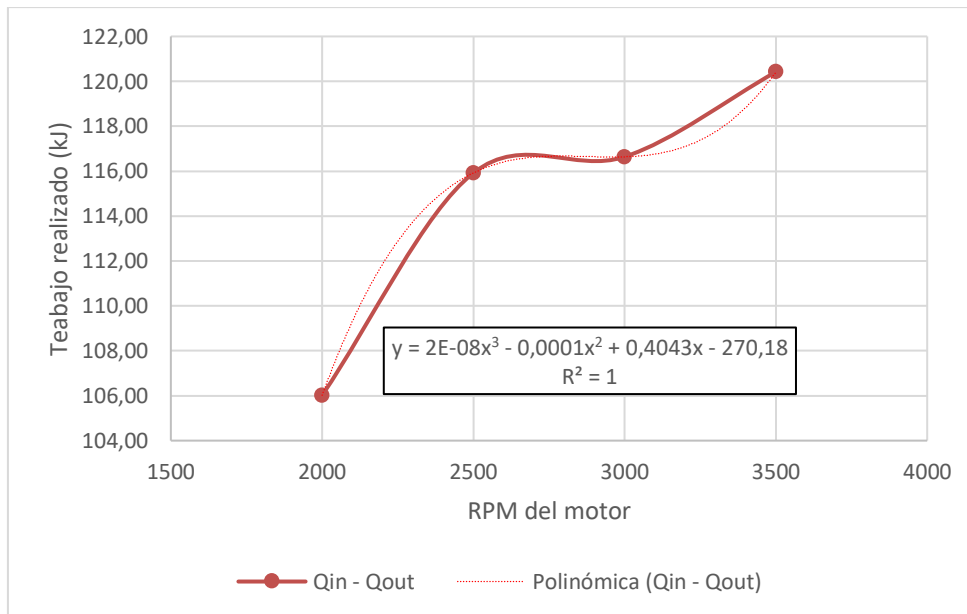


Figura 22 – Trabajo realizado

Finalmente, la eficiencia térmica del motor se calculó para cada una de las revoluciones evaluadas. Recordando que **para este caso hubo corrección de la temperatura a partir del método de los mínimos cuadrados ordinarios** medida en cada uno de los puntos

experimentales. La siguiente figura confirma que la máxima eficiencia del motor equivale a 70.0% en 3500 RPM.

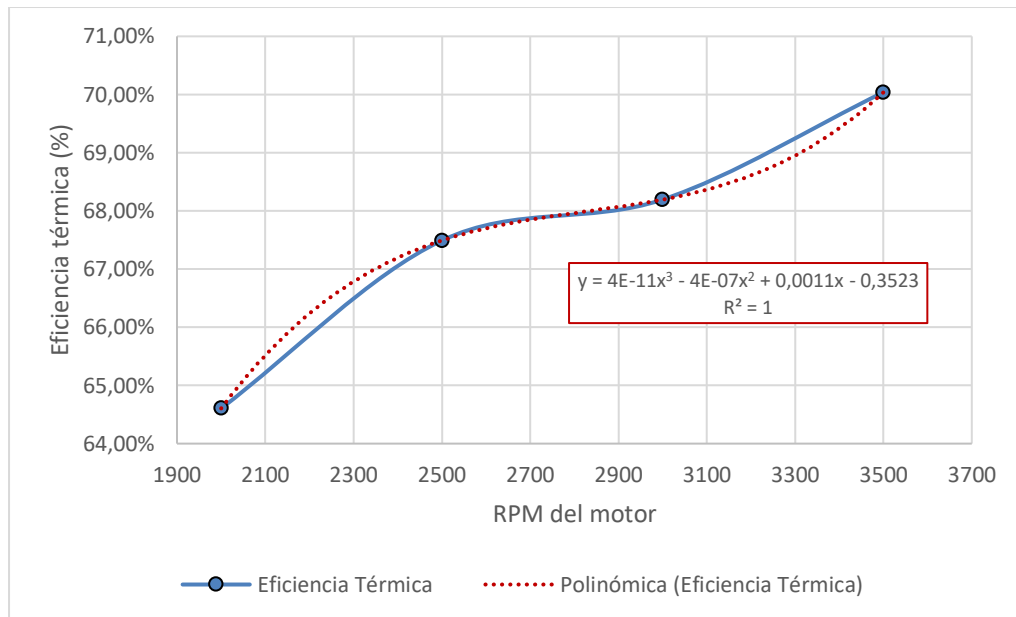


Figura 23 – Eficiencia térmica y ecuación de rendimiento

A seguir se explica el mismo procedimiento, pero para la situación donde la temperatura medida es corregida a partir del error sistemático.

3.2.3 Método #3: utilizando el error sistemático para corregir el valor de la temperatura

A partir de los siguientes datos experimentales fue posible realizar toda la parte analítica del proyecto. La siguiente tabla consolida los resultados experimentales obtenidos en el laboratorio:

Tabla 16 – 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	3630	3622	8	680	11,76	48	270	115	32	50
60		3622	3614	8	680	11,76	48	278	115	32	51
60		3614	3604	10	680	14,71	47	282	115	32	52

60		3604	3593	11	680	16,18	49	286	115	32	52
60	2500	3593	3584	9	680	13,24	48	291	116	32	52
60		3584	3576	8	680	11,76	50	291	116	32	52
60		3576	3569	7	680	10,29	49	290	116	32	52
60		3569	3563	6	680	8,82	49	291	116	32	52
60		3563	3558	5	680	7,35	50	291	118	32	52
60	3000	3558	3550	8	680	11,76	50	290	118	32	52
60		3550	3541	9	680	13,24	50	290	118	32	52
60		3541	3531	10	680	14,71	49	291	118	32	52
60		3531	3522	9	680	13,24	50	293	118	32	51
60	3400	3522	3513	9	680	13,24	50	293	118	32	51
60		3513	3504	9	680	13,24	50	293	118	32	51
60		3504	3496	8	680	11,76	51	290	118	32	51
60		3504	3496	8	680	11,76	51	290	118	32	51

La tabla anterior presenta el consumo de combustible en volumen y en masa. Además, consolida la medición de temperatura en cada uno de los estados del ciclo Otto.

En relación al consumo de combustible la siguiente tabla presenta que el mayor consumo se da cuando el motor opera a 3000 RPM. La figura siguiente confirma este comportamiento.

Tabla 17 – Consumo específico y volumétrico de combustible

RPM	Mi - Mf (g) (promedio)	Mi - Mf (g) (Incertidumbre)	Volumen Consumido (ml) (promedio)	Volumen Consumido (ml) (Incertidumbre)
2000	9,25	0,75	13,60	1,10
2500	7,50	0,65	11,03	0,95
3000	8,00	1,08	11,76	1,59
3400	8,75	0,25	12,87	0,37

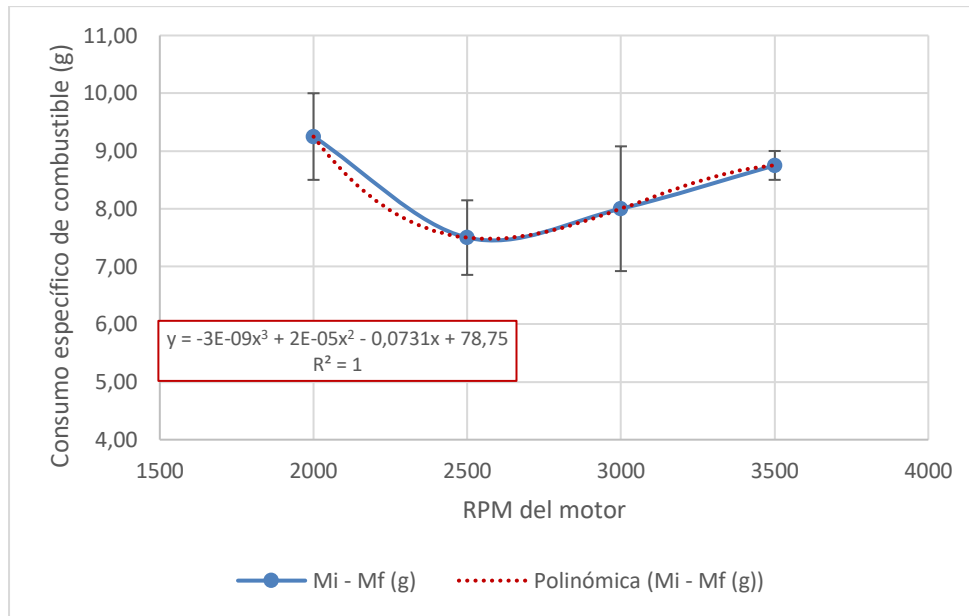


Figura 24 – Consumo específico de combustible

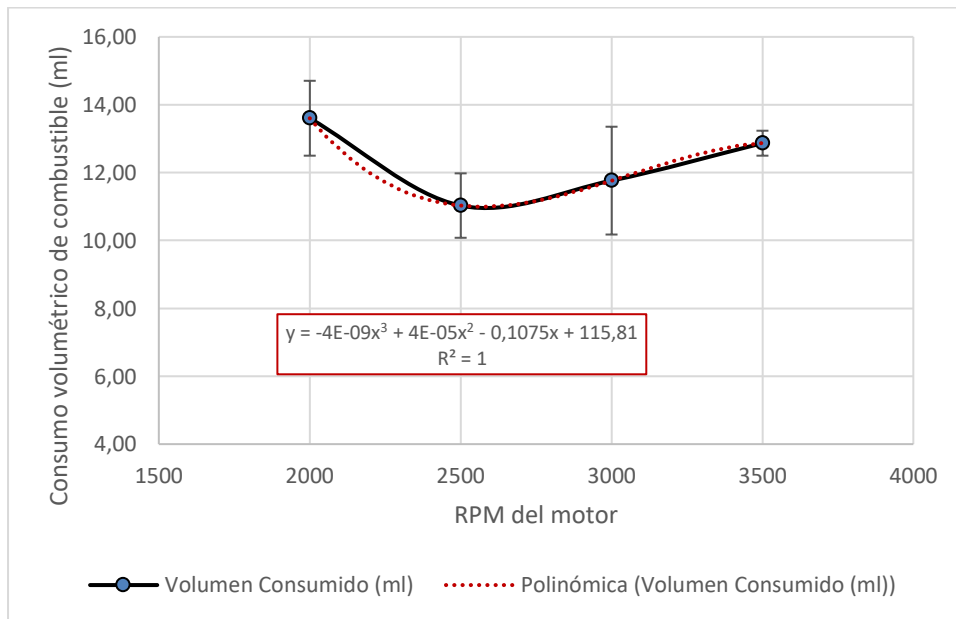


Figura 25 – Consumo volumétrico de combustible

Por otro lado, durante los procesos de entrada y salida de calor se da, respectivamente, en la combustión y el escape, se realizó el cálculo en función de cada una de las revoluciones evaluadas. La siguiente tabla y la figura confirman los resultados.

Tabla 18 – Calor de entrada (Q_{in}), calor de salida (Q_{out})

RPM	Q_{in}	Q_{out}	$Q_{in} - Q_{out}$
2000	164,02	57,96	106,06
2500	171,76	55,80	115,96
3000	171,04	54,36	116,68
3500	171,94	51,48	120,46

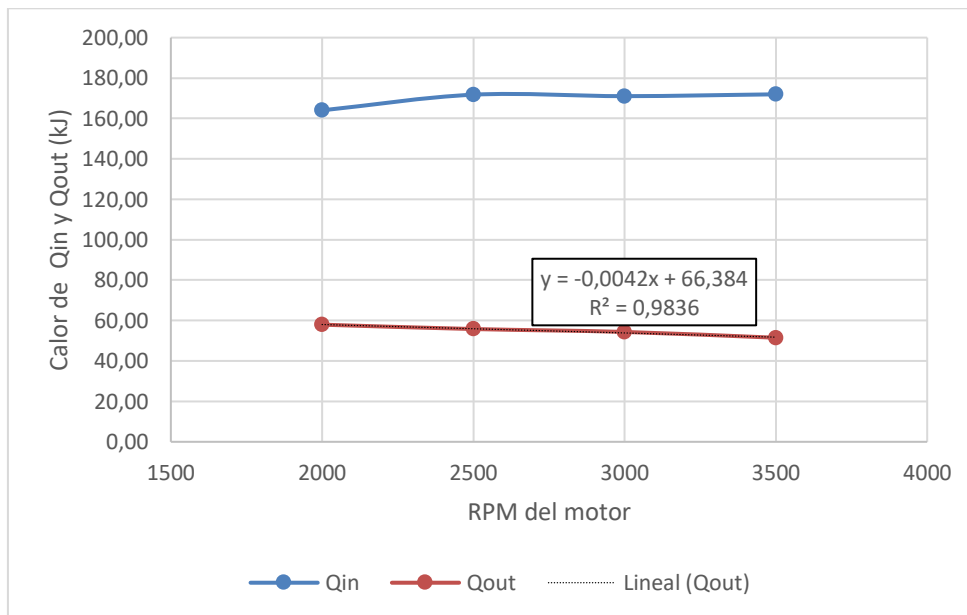


Figura 26 – Calor de entrada al proceso (Q_{in}) y calor perdido en el proceso (Q_{out})

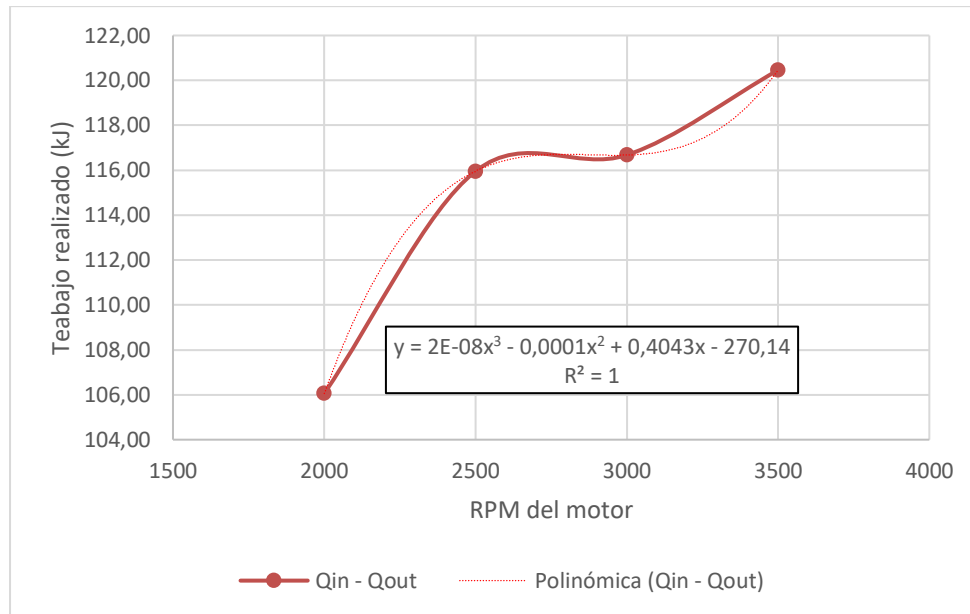


Figura 27 – Trabajo realizado

Finalmente, la eficiencia térmica del motor se calculó para cada una de las revoluciones evaluadas. Recordando que **para este caso hubo corrección de la temperatura a partir del error sistemático** en cada uno de los puntos experimentales. La siguiente figura confirma que la máxima eficiencia del motor equivale a 70.0% en 3500 RPM.

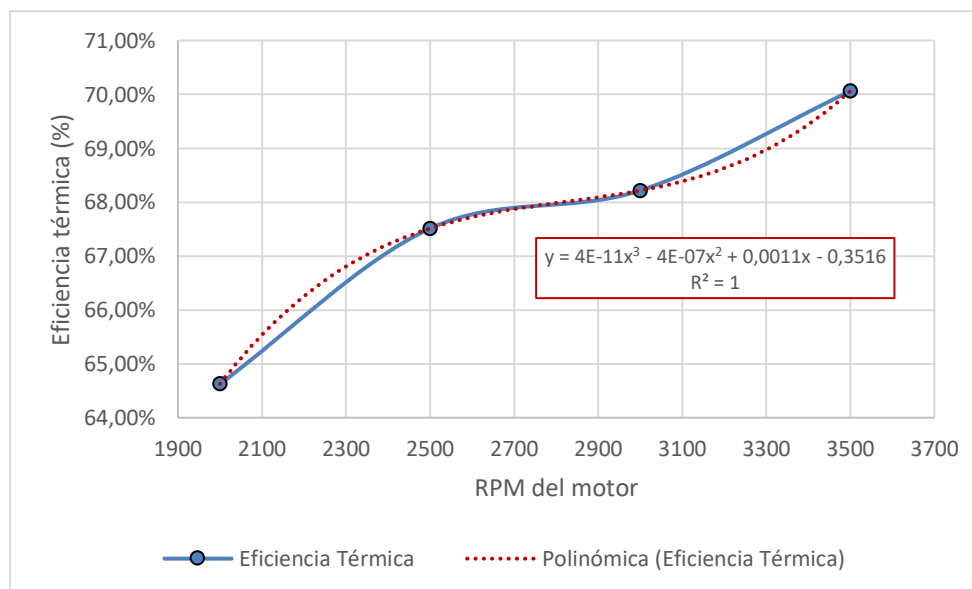


Figura 28 – Eficiencia térmica y ecuación de rendimiento

A seguir se realiza el cálculo de las presiones y se comparan los resultados de los tres métodos evaluados.

3.2.4 Comparación de resultados

Utilizando las ecuaciones consolidados al inicio de este capítulo, fue posible determinar el valor de la presión en cada punto del ciclo otto. A seguir la tabla consolida los resultados:

Tabla 19 – Calor de entrada (Q_{in}), calor de salida (Q_{out})

Método de cálculo de la eficiencia	P1	P2	P3	P4	RPM	Eficiencia Térmica (Por Temp. Medida)	Eficiencia Térmica (Por Temp. Corregida por Polinomio)	Eficiencia Térmica (Por Temp. Corregida por Error Sistemático)
Eficiencia Térmica (Por Temp. Medida)	101	666,2	3747,4	414,8	2000	62,31%	64,60%	64,63%
Eficiencia Térmica (Por Temp. Corregida por Polinomio)	101	678,4	3754,9	397,0	2500	63,60%	67,49%	67,51%
Eficiencia Térmica (Por Temp. Corregida por Error Sistemático)	101	676,0	3744,5	396,8	3000	62,62%	68,20%	68,22%
					3500	62,81%	70,04%	70,06%

Se puede observar en la tabla anterior que realmente hay una variación en el cálculo de las presiones, esto debido a que, por las relaciones termodinámicas y adoptadas en el ciclo Otto, la presión depende de la temperatura medida en cada uno de los procesos. Adicionalmente, se puede observar de la tabla anterior la eficiencia térmica determinada para cada uno de los métodos evaluados. Se puede observar que es muy recomendable corregir el valor de la temperatura, sea por el error sistema o por el polinomio de ajuste, una vez que se evidencia que ambos casos existen una ganancia en la efectiva térmica del motor.

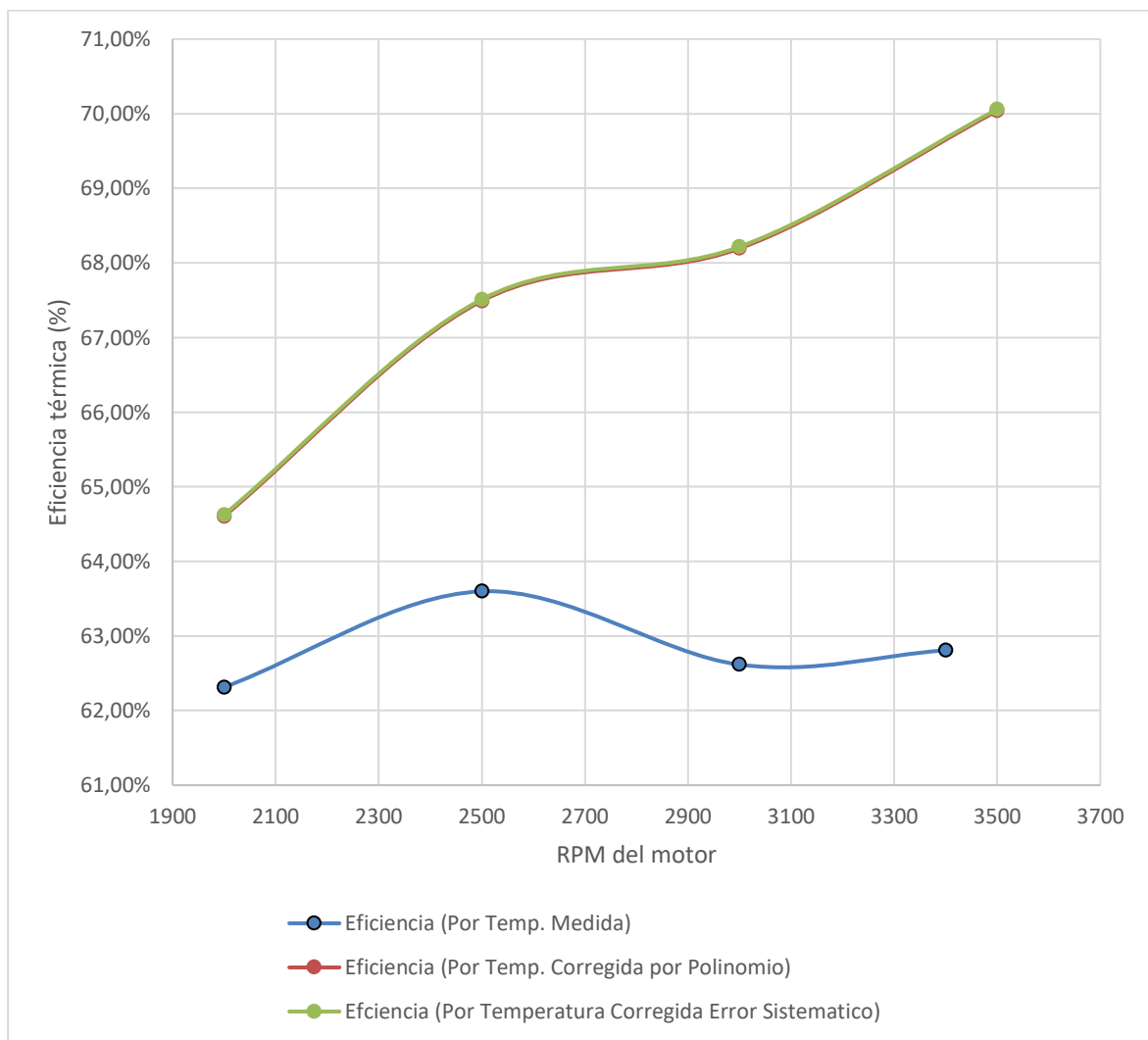


Figura 29 – Eficiencia térmica y ecuación de rendimiento comparando los tres métodos

4. Conclusiones y recomendaciones

Los resultados de este proyecto de grado permitieron alcanzar el objetivo general propuesto al inicio de la investigación, el cual es: “Evaluar la Influencia de la curva de calibración analítica en la confiabilidad metrológica de un ciclo Otto”. Así mismo, los objetivos específicos originalmente formulados fueron atendidos en total plenitud.

En relación al primer objetivo específico –*Realizar la calibración de los sensores de temperatura, con el propósito de conocer el error medición asociado a la temperatura y su incertidumbre*– fue posible realizar la calibración en tiempo real de los sensores de temperatura, obteniendo como resultado que todos los sensores se encuentra dentro de la tolerancia establecida para el proceso igual a 0,2 °C.

En relación al segundo objetivo específico –*Calcular las presiones asociadas a cada etapa del ciclo Otto, así como la incertidumbre asociada en cada etapa, con el fin de conocer la confiabilidad en el cálculo de la relación de presión del motor*– los valores de presión fueron calculados para cada uno de los métodos evaluados. Se observó que para el caso donde se tuvo la mayor eficiencia térmica las presiones eran más elevadas, principalmente, en el proceso de combustión.

Para el tercer objetivo específico – *Calcular la eficiencia térmica del ciclo Otto a partir de la medición de temperatura sin corrección, datos corregidos por el error sistemático y datos corregidos por la curva analítica de calibración*– se observó que resulta muy útil para proceso del ciclo térmico corregir la temperatura. Los resultados consolidados permitieron concluir que la corrección de la temperatura sea por el método polinomial o por el error sistemático, aumenta la eficiencia del ciclo en hasta 5%, lo que resulta muy provecho en términos energéticos y económicos relacionados al proceso.

A partir de los resultados y conclusiones obtenidos, se permiten los autores en realizar las siguientes recomendaciones para trabajos futuros:

- Adoptar métodos estadísticos no paramétricos para comparar los resultados obtenidos en cuanto a la eficiencia térmica del motor de combustión a partir de los tres métodos evaluados en este proyecto de grado.
- Realizar el análisis usando otros combustibles y /o aditivos que permitan evaluar, también, la eficiencia térmica en relación a la variación del combustible.

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.aplthermaleng.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 Martinez, "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. Narváez 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>.