



Diseño de una herramienta de cálculo para evaluar la confiabilidad metrológica del sistema térmico y gravimétrico del motor de combustión interna de la UAN-Sede Puerto Colombia

**Jainer Jesús Buendía Waut
Gary Arias Araujo**

Universidad Antonio Nariño
Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica
Puerto Colombia, Colombia
2020

Diseño de una herramienta de cálculo para evaluar la confiabilidad metrológica del sistema térmico y gravimétrico del motor de combustión interna de la UAN-Sede Puerto Colombia

**Jainer Jesús Buendía Waut
Gary Arias Araujo**

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

2020

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

Los autores.

Agradecimientos

A DIOS por ser nuestro creador, por darnos la vida y bendecirnos cada día.

A nuestras familias por ser nuestro principal apoyo y motivación, cada día de nuestras vidas.

Agradecemos el apoyo de los técnicos Electricistas Luis Soto, Marcel Larios, al Mecánico automotriz Wilder Ariza, al compañero de la Universidad Juan Maldonado.

Agradecemos, muy especialmente, a nuestro profesor José Daniel Hernández Vásquez por su orientación a lo largo del proyecto. A nuestra Institución Universidad Antonio Nariño Sede Puerto Colombia por permitirnos trabajar en sus instalaciones, así como por los años de estudio y enseñanza.

Resumen

Este trabajo tiene por objetivo principal diseñar una herramienta de cálculo para evaluar la confiabilidad metrológica del sistema térmico y gravimétrico del motor de combustión interna de la UAN-Sede Puerto Colombia. La motivación principal para el desarrollo del proyecto fue en la necesidad detectada de recuperar y colocar al servicio de la comunidad estudiantil de la UAN-Sede Puerto Colombia, el motor de combustión interna del laboratorio de experimento. En este sentido, este trabajo está delimitado a ser un punto de partida para continuar desarrollando futuros proyectos orientados en la recuperación del motor para actividades académicas, así como aquellas inherentes a la ciencia, la tecnología y la innovación. En términos específicos, el proyecto se centró en una corta parte experimental donde fue posible diseñar e implementar un nuevo sistema de automatización PLC del sistema de control del motor de combustión. Una segunda parte, que enmarca la contribución del proyecto de grado, se enfocó en el desarrollo de robustas herramientas de cálculos que permitirán, con mucha facilidad, conocer los errores y las incertidumbres asociadas al sistema de medición de temperatura y consumo de combustible específico mediante el método gravimétrico. Como conclusión, se obtuvo que la herramienta de cálculo desarrollada se mostró eficaz, una vez que fue validada mediante el uso de datos experimentales disponibles en la literatura especializada y está disponible para que sea utilizada proyectos subsecuentes dentro de la misma área de investigación.

Palabras clave: Incertidumbre de Medición, Ingeniería Mecánica, Metrología, Motores de Combustión Interna.

Abstract

The main objective of this work is to design a calculation tool to evaluate the metrological reliability of the thermal and gravimetric system of the internal combustion engine of the UAN-Sede Puerto Colombia. The main motivation for the development of the project was the detected need to recover and place at the service of the student community of the UAN-Sede Puerto Colombia, the internal combustion engine of the experiment laboratory. In this sense, and considering the current problems related to COVID-19, this work aims to be a starting point to continue developing future projects aimed at motor recovery for academic activities, as well as those inherent in science, technology and the innovation. In specific terms, the project focused on a short experimental part where it was possible to design and implement a new PLC automation system for the combustion engine control system. A second part, which frames the contribution of the degree project, focused on the development of robust calculation tools that will allow, very easily, to know the errors and uncertainties associated with the system for measuring temperature and specific fuel consumption through the gravimetric method. In conclusion, it was found that the developed calculation tool was effective, once it was validated through the use of experimental data available in the specialized literature and it is available for subsequent projects within the same research area to be used.

Keywords: Internal Combustion Engines, Measurement Uncertainty, Mechanical Engineering, Metrology.

Contenido

1. Introducción	14
1.1 Formulación del problema	14
1.2 Objetivos	15
1.2.1 Objetivo general.....	15
1.2.2 Objetivos específicos.....	15
1.3 Justificación.....	16
2. Fundamentos del motor de combustión.....	17
2.1 Breve historia del motor de combustión.....	17
2.2 Ciclo de trabajo de un motor de combustión interna a gasolina.....	18
2.3 Ciclo Otto representado en un diagrama P-V	20
2.4 Rendimiento térmico de un Ciclo Otto	22
3. Fundamentos del análisis de incertidumbre	24
3.1 Incertidumbre de medición	24
3.2 Incertidumbre Tipo A	25
3.3 Incertidumbre Tipo B	26
3.4 Distribución rectangular.....	27
3.5 Distribución normal y <i>t-student</i>	29
3.6 Incertidumbre combinada	31
3.7 Factor de cobertura	32
3.8 Incertidumbre expandida	32
3.9 Incertidumbre asociada a la interpolación polinomial.....	33
4. Diseño metodológico	36
5. Resultados y discusión	40
5.1 Programación del sistema de automatización PLC.....	40
5.2 Herramienta para evaluar la confiabilidad del sistema de medición de temperatura	45
5.3 Herramienta para evaluar la confiabilidad del sistema de gravimétrico.....	54
5.4 Influencia de la calibración de los sensores de temperatura en el motor	62
6. Conclusiones y recomendaciones.....	66
Bibliografía	68
Anexo A: Tabla de una Distribución Normal	71
Anexo B: Tabla de una Distribución <i>t-student</i>	72

Lista de figuras

Figura 1 – Cuatro tiempos en un Motor de Combustión Interna	18
Figura 2 – Diagrama P-V de un Ciclo Otto	20
Figura 3 – Método de estimación de la incertidumbre de medición	25
Figura 4 – Distribución rectangular de probabilidad	27
Figura 5 – Media y varianza de una distribución normal.....	29
Figura 6 – Probabilidad asociada al área bajo la curva de una Dist. Normal estándar	30
Figura 7 – Curva t-student aproximada a una Distribución Normal estándar	31
Figura 8 – Motor de Combustión Interna de la UAN-Sede Puerto Colombia	36
Figura 9 – Partes del Motor de Combustión Interna	37
Figura 10 – Panel de Control del Motor de Combustión Interna	37
Figura 11 – Tablero de control original del motor de combustión interna.....	40
Figura 12 – Implementación del sistema de automatización PLC	41
Figura 13 – Plano Eléctrico del sistema de automatización PLC	42
Figura 14 – Representación gráfica de los polinomios considerados	48
Figura 15 – Error total asociado a la calibración de los sensores de temperatura	54
Figura 16 – Curva de calibración de un polinomio lineal	61
Figura 17 – Curva de resultados de carga ascendente	62
Figura 18 – Curva de resultados de carga descendente	62
Figura 19 – Impacto del error de calibración en los parámetros Q_{in} y Q_{out}	65

Lista de tablas

Tabla 1 – Características técnicas del motor-generator Yamaha	36
Tabla 2 – Registro de los datos de la calibración	46
Tabla 3 – Cálculo del error sistemático no ajustado	47
Tabla 4 – Cálculo de los coeficientes de los polinomios interpoladores	49
Tabla 5 – Temperatura ajusta por el polinomio	49
Tabla 6 – Cálculo del término que computa el error cuadrático.....	50
Tabla 7 – Incertidumbre de ajuste.....	50
Tabla 8 – Factor de cobertura k	51
Tabla 9 – Componentes de la incertidumbre expandida.....	52
Tabla 10 – Cálculo de la temperatura ajustada y el error sistemático asociado	53
Tabla 11 – Cálculo de la temperatura ajustada y el error sistemático asociado	55
Tabla 12 – Configuración de las masas patrón	56
Tabla 13 – Ingreso de los valores de incertidumbre de las masas patrón	57
Tabla 14 – Resultados asociados a la calibración (balanza carga ascendente).....	57
Tabla 15 – Resultados asociados a la calibración (balanza carga descendente).....	58
Tabla 16 – Resultados del análisis de incertidumbre.....	61
Tabla 17 – Valores típicos de temperatura en un motor de combustión	63
Tabla 18 – Porcentaje de error obtenido en la calibración de los sensores.....	63
Tabla 19 – influencia del error de calibración en Q_{in} , Q_{out} y n_t	64

1. Introducción

Los orígenes de los motores son muy remotos. Especialmente si se consideran los inicios o precedentes de algunos elementos constitutivos de los motores, imprescindibles para su funcionamiento como tales [1-3].

Considerados como máquinas completas y funcionales, y productoras de energía mecánica, hay algunos ejemplos de motores antes del siglo XIX. A partir de la producción comercial de petróleo a mediados del siglo XIX (1850) las mejoras e innovaciones fueron muy importantes. A finales de ese siglo había una multitud de variedades de motores usados en todo tipo de aplicaciones [4-5].

En la actualidad los motores de combustión interna, a pesar de los problemas asociados (dependencia del petróleo, contaminación del aire, aumento de los niveles de CO₂) son todavía imprescindibles y se fabrican según diseños muy diferentes y una gama muy amplia de potencias que va desde pocos vatios hasta miles de kW [6].

En particular, el motor de combustión interna del laboratorio de experimentos, fue producto de un proyecto de investigación realizado dentro de la convocatoria interna propuesta por la VCTI (Vicerrectoría de Ciencia, Tecnología e Innovación) de la Universidad Antonio Nariño. El proyecto desarrollado por Duarte [7] se constituyó en su momento, un avance para la ciencia e investigación de la Universidad debido a la concepción e implementación del sistema, generando diversos productos científicos en revistas especializadas [8-11].

1.1 Formulación del problema

Actualmente, el Laboratorio de Experimentos de la Universidad Antonio Nariño (Sede Puerto Colombia) cuenta con un motor de combustión interna el cual no se encuentra operativo y con necesidad de un mantenimiento, así como su puesta en marcha para actividades académicas, científicas e investigativa. Esto impacta directamente en los

resultados de experimentos académicos realizados por el estudiantado que. Esto genera una falencia al futuro ingeniero de la Universidad Antonio Nariño, una vez que un Laboratorio está íntimamente relacionado a la reproducción de experiencia de ingeniería que el futuro egresado enfrentará en la industria. En este sentido, conocer el funcionamiento y características de un motor de combustión interna, se torna un factor relevante en la formación del estudiante. Además, su utilización se constituye en una recuperación de un activo fijo de la institución. En este orden de ideas y en virtud a la problemática nacional e internacional derivada del COVID-19, este trabajo de grado está delimitado a diseñar una herramienta de cálculo que permita, en trabajos futuros, realizar experimentos, recuperar y poner en marcha este motor, evaluando la confiabilidad metrológica de los sensores de temperatura y la implementación de un sistema gravimétrico para la medición del consumo específico de combustible, entre otras actividades. A seguir, se define la pregunta problema:

¿Qué parámetros de debe contener una herramienta de cálculo para evaluar la confiabilidad metrológica del sistema térmico y gravimétrico del motor de combustión interna de la UAN-Sede Puerto Colombia?

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Diseñar una herramienta de cálculo para evaluar la confiabilidad metrológica del sistema térmico y gravimétrico del motor de combustión interna de la UAN-Sede Puerto Colombia.

1.2.2 Objetivos específicos

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

- Programar un sistema de automatización PLC (Programmable Logic Controller) que permita el control de temperatura de los procesos asociados al motor de combustión interna.
- Elaborar una herramienta de cálculo en Excel que permita evaluar la confiabilidad metrológica del sistema de medición de temperatura en el motor de combustión interna.

- Elaborar una herramienta de cálculo en Excel que permita evaluar la confiabilidad metrológica del sistema gravimétrico utilizado para la medición del consumo específico de combustible.

1.3 Justificación

Este proyecto de investigación encuentra su fundamento en la búsqueda del mejoramiento continuo de los conocimientos a fondo de cómo funciona un motor de combustión interna, cuáles son las partes que lo conforman, cuáles son las temperaturas que maneja durante su funcionamiento y los parámetros termodinámicos que lo caracterizan. De igual forma, se busca contribuir con la elaboración de herramientas de cálculo robustas que permitan evaluar la confiabilidad metrológica de los sensores de temperatura asociados al motor, así como de la implementación de un sistema gravimétrico para la medición del consumo de combustible y la evaluación de parámetros termodinámicos asociados al funcionamiento de un motor de combustión interna.

2. Fundamentos del motor de combustión

Este segundo capítulo detalla ampliamente la fundamentación teórica y conceptos básicos relacionados con el proyecto de investigación.

2.1 Breve historia del motor de combustión

El francés Etienne Lenoir construyó el primer motor de combustión interna en el año de 1863. Sin embargo, solo hasta el año 1876 este primer motor tuvo una notable mejora a partir de las innovaciones introducidas por el ingeniero alemán Nikolaus Otto [12]. Una de las mejoras sustanciales introducidas por Otto fue el funcionamiento del motor a partir de un ciclo que se ejecutaba en cuatro tiempos [13-16]. Así, a lo largo de la historia, se conoce al motor de gasolina, como el motor Otto, en honor al ingeniero alemán del mismo nombre. Dos años más tardes, otro ingeniero, esta vez natural de Escocia, Dugald Clerk, construyó un motor que conseguía realizar todo el proceso termodinámico en dos tiempos [17]. Pasaron siete años para que Daimler, utilice el invento realizado por Clerk, montando el motor sobre un vehículo de dos ruedas realizado por el ingeniero Maybach, dando lugar así, a la primera motocicleta fabricada en el mundo [18]. Con el avance de distintos estudios en el área, en 1886, un ingeniero de nombre Karl Benz, construyó un automóvil de tres ruedas, siendo el primero en su especie. Sin embargo, aún en 1886, Daimler consiguió aplicar el motor de dos tiempos a un vehículo de cuatro ruedas. En este punto, inicia la historia del automóvil como lo conocemos hoy en día [19]. Seis años más tarde de la innovación realizada por Daimler, fue otro ingeniero alemán, Rudolf Diesel, quien inventa y propone un motor que basa su principio de físico de operación con combustibles pesados, no necesitando un sistema de autoencendido, el cual recibe el nombre de Motor Diesel [20]. Para el año de 1897 fue construido el primer motor Diesel, teniendo como

principal característica, en comparación con los motores Otto, una mayor potencia y mayor peso. Tuvo que pasar 25 años, en 1923, para que este motor fuese instalado, por primera vez, en un camión. A inicios del siglo XX, en Barcelona (España), se fabrica el primer automóvil el cual estaba equipado con un motor que constaba de cuatro cilindros y una potencia de 20 CV. Finalmente, en el proceso constante de evolución de los motores, en 1957, otro ingeniero de alemán llamando Félix Wankel, propuso un motor de pistón rotativo, el cual, hoy en día, se utiliza en diversos autos de alta gama debido a su simplicidad, menos piezas y, consecuentemente, menos peso [21].

2.2 Ciclo de trabajo de un motor de combustión interna a gasolina

El motor de combustión interna a gasolina, también denominado motor Otto, es el más utilizado en el mundo contemporáneo en los automóviles. Este motor realiza todo el proceso termodinámico en cuatro fases, llamados también, cuatro tiempos. En estas fases el pistón realiza cuatro desplazamientos al interior del cilindro. En conexión a un sistema de biela-manivela, el movimiento lineal del pistón es transformando en un movimiento rotacional del árbol cigüeñal. Los cuatro procesos del motor de combustión interna son, de forma secuencial, los siguientes: admisión, compresión, expansión y escape. La Figura 1 ilustra la secuencia lógica al interior del cilindro de un motor de combustión interna.

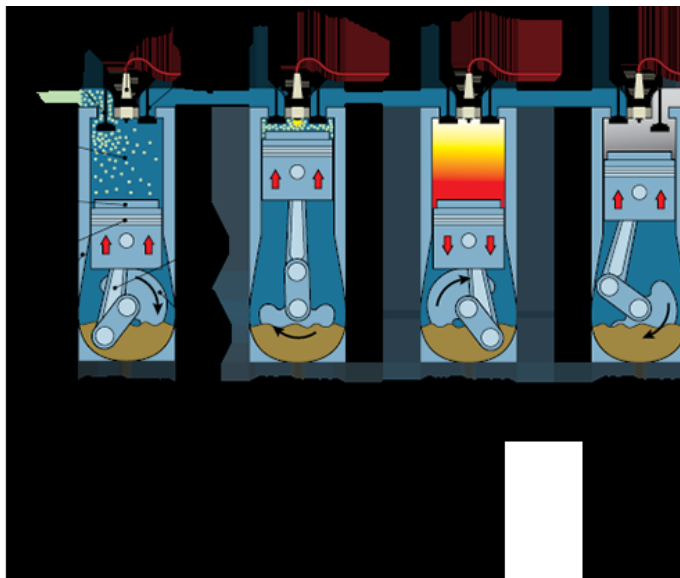


Figura 1 – Cuatro tiempos en un Motor de Combustión Interna

Durante el primer tiempo (**proceso de admisión**), el pistón se desplaza desde el punto más alto de su carrera (punto muerto superior, PMS) al punto más bajo (punto muerto inferior, PMI). De este modo, se efectúa la primera carrera del pistón, también llamado, primer desplazamiento lineal. Durante este desplazamiento el cigüeñal realiza un giro de 180°. En este proceso, la válvula de admisión se encuentra abierta y, como consecuencia del aumento de volumen al interior del cilindro –producto de una diferencia de presión entre el ambiente exterior y el sistema cilíndrico– se produce un vacío aspirando, de esta forma, la mezcla de aire-combustible, llenándose completamente el interior del cilindro. Al momento que el pistón se localiza en el PMI, la válvula de admisión es cerrada y la totalidad de la mezcla permanece al interior del cilindro. Finalizado este proceso, se inicia el segundo tiempo llamado **proceso de compresión**. En este tiempo el pistón se desplaza desde el PMI hasta el PMS, produciendo así, la segunda carrera del pistón. En este proceso el cigüeñal ha realizado otro giro de 180° y, en este momento, se ha completado la primera vuelta completa del cigüeñal. Una de las principales características de este proceso es que, durante el desplazamiento ascendente las válvulas, tanto de admisión como de escape, permanecen cerradas. De esta forma, el pistón puede comprimir completamente la mezcla aire-combustible, reduciendo el volumen de ésta según haya sido diseñada la relación de compresión del motor. Adicionalmente, en este proceso se produce un aumento de temperatura en la mezcla, lo que beneficia la evaporación de la mezcla al interior del cilindro. En este punto, vale la pena destacar, que en una vuelta completa del cigüeñal (360°) se han producido dos procesos termodinámicos.

Posteriormente, en el instante que el pistón llega al PMS, una bujía produce una chispa eléctrica al interior de la cámara de combustión. Como consecuencia, se produce una quema rápida de la mezcla, lo que aumento mucho más la temperatura y aumento considerable de la presión. Siendo estos, los valores máximos de temperatura y presión en todo el ciclo. La alta presión del sistema desplaza hacia el PMI el pistón, produciéndose una transformación de la energía. Es decir, la energía calorífica de la combustión se transforma en energía mecánica, produciendo así el trabajo mecánico durante este **proceso de expansión**. A medida que el pistón va descendiendo desde el PMS hasta el PMI, la válvula de escape permanece abierta y el sistema sufre una despresurización. Esta carrera de desplazamiento es conocida como carrera motriz. Esto debido a que es la única en todo el ciclo que produce trabajo. En este proceso el cigüeñal gira otros 180°.

Finalmente, el cuarto tiempo es conocido como el **proceso de escape**. En este proceso el pistón realiza la cuarta (última) carrera desde el PMI hasta el PMS y el cigüeñal gira otros 180° , completando de esta forma, dos vueltas. Este proceso se caracteriza porque al final de la carrera de expansión, la válvula de escape se abre y a través de ella, debido a la diferencia de presión, los gases producto de la combustión son expulsados al ambiente atmosférico. Por otro lado, el resto de los gases, que no consiguen salir, son desplazados por el pistón en su carrera al punto muerto superior.

2.3 Ciclo Otto representado en un diagrama P-V

El ciclo Otto representado en un diagrama P-V, se puede considerar ejecutado según las siguientes transformaciones termodinámicas, las cuales están relacionadas con los procesos ilustrados en la Figura 2:

- Proceso 0-1: Admisión (Isobara)
- Proceso 1-2: Compresión (Adiabática)
- Proceso 2-3: Combustión (isócora)
- Proceso 3-4: Expansión (Adiabática)
- Proceso 4-1: Primera fase del escape (Isócora)
- Proceso 1-0: Segunda fase del escape (Isobara)

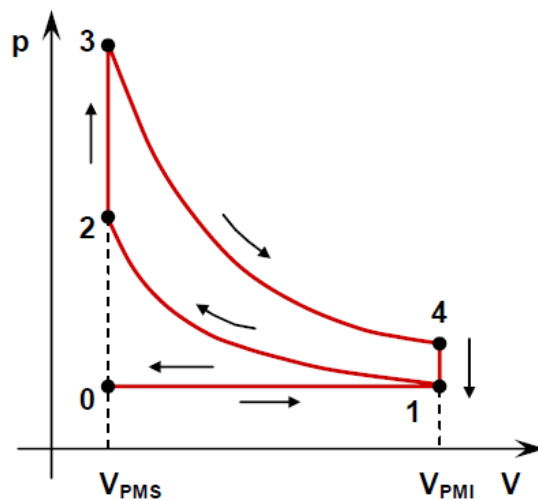


Figura 2 – Diagrama P-V de un Ciclo Otto

Durante el proceso de admisión isobárico, se considera la hipótesis que los gases provenientes de la atmósfera entran al cilindro sin experimentar pérdidas por fricción en las paredes debido al rozamiento. De esta forma, no existe pérdida de carga y, consecuentemente, no se produce una caída de presión durante el proceso de admisión (proceso 0-1), siendo así, un proceso isobárico, es decir, a presión constante. Ya, en el proceso de compresión (proceso 1-2), se asume la hipótesis que el fluido no intercambia calor con el medio exterior. Esta hipótesis se fundamenta en el hecho que el proceso se realiza de forma muy rápida lo que dificulta la transferencia de calor. De esta forma, se considera una transformación adiabática (sin transferencia de calor). En este momento, se destaca que este proceso también es considerado isentrópico. Esto debido a que al no producirse transferencia de calor y, adicionalmente, todos los procesos de los ciclos teóricos son considerados reversibles, a partir de la desigualdad de Clausius, es posible concluir que el proceso también es isentrópico, es decir, a entropía constante. En otras palabras, un proceso adiabático-reversible, también es considerado un proceso isentrópico. Para el proceso 2-3, se asume la hipótesis que al momento de saltar la chispa, se produce una combustión instantánea del combustible, produciendo una cierta cantidad de calor. Al ser un proceso tan rápido, se puede considerar que el pistón no tiene tiempo para realizar un gran desplazamiento. De esta forma, el volumen se mantiene constante. Para el proceso 3-4, los gases quemados no cuentan con mucho tiempo para intercambiar calor con el medio exterior debido a la rapidez del giro del motor. En este orden de ideas, se puede considerar que este proceso sufre una transformación adiabática, es decir, sin transferencia de calor. Finalmente, el proceso de escape puede ser analizado en dos vertientes. Una primera etapa (proceso 4-1) supone una apertura de la válvula de forma instantánea, lo que genera una salida rápida y súbita de los gases menos densos (i.e.: con mayor temperatura) al interior del cilindro, produciendo de esta forma, una pérdida de calor en el sistema. Adicionalmente, al ser un proceso rápido, se considera que se realiza a volumen constante (isocórico). Luego, en una segunda etapa el pistón se desplaza hacia el PMS provocando una expulsión de gases remanentes al interior del cilindro. Se considera que estos gases no ofrecen resistencia para salir del cilindro hacia la atmósfera. Como consecuencia de este proceso, la presión al interior del cilindro permanece constante, siendo igual a la presión atmosférica (proceso 1-0).

2.4 Rendimiento térmico de un Ciclo Otto

En los motores de combustión interna, cuyo funcionamiento se basa en el ciclo Otto, el calor (Q_{in}) se introduce a volumen constante (proceso 2-3) y, adicionalmente, el fluido operante es supuesto un gas perfecto, es posible estimar la cantidad de calor mediante la variación de la energía interna, conforme la Ecuación (1):

$$Q_{in} = C_v \cdot (T_3 - T_2) \quad (1)$$

En la expresión anterior, Q_{in} : denota el calor adicionado en la combustión; C_v : denota el calor específico a volumen constante; T_3 : denota la temperatura al final del proceso de combustión y T_2 : denota la temperatura al final del proceso de compresión.

De forma análoga, se puede concluir que el calor rechazado al ambiente (Q_{out}) puede ser determinado mediante el mismo principio, una vez que el proceso 4-1 también se realiza de forma isocórica. La Ecuación (2) muestra la expresión para determinar el calor rechazado en el proceso 4-1:

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

En la expresión anterior, Q_{out} : denota el calor perdido en el ciclo; C_v : denota el calor específico a volumen constante; T_4 : denota la temperatura al final del proceso de expansión y T_1 : denota la temperatura al final del proceso de admisión

Análogamente, como el calor (Q_{out}) es sustraído también a volumen constante, el rendimiento térmico del ciclo (η_t) puede ser calculado mediante la Ecuación (3):

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

Para las transformaciones adiabáticas de compresión 1-2, y de expansión 3-4 se obtiene:

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

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

En las ecuaciones anteriores, γ : denota el coeficiente de dilatación adiabática que es una relación entre los coeficientes caloríficos a presión y volumen constante. Además, considerando que $V_1 = V_4$ y $V_2 = V_3$, se obtiene como resultado que:

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

Introduciendo esta relación en la expresión del rendimiento térmico (Ecuación 3), así como la relación que existe entre las temperaturas T_1 y T_2 de la fase 1-2 de compresión adiabática, se tiene como resultado la siguiente expresión para el cálculo del rendimiento térmico:

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

La relación de compresión (r_c) es dada por una relación entre los volúmenes iniciales y finales, conforme se indica en la siguiente expresión:

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

Remplazando la Ecuación (8) en la Ecuación (7), finalmente, el rendimiento térmico puede ser determinado en función de la relación de compresión del motor, a partir de la Ecuación (9), conforme se ilustra a continuación:

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

3. Fundamentos del análisis de incertidumbre

Este tercer capítulo describe los fundamentos para el análisis de la incertidumbre de medición. Esta sección fundamenta la base conceptual y matemática de la elaboración de las planillas de cálculo propuesta en los objetivos específicos. Los fundamentos y ecuaciones aquí documentadas aplican para cualquier sistema y/o proceso de medición, incluyendo, la evaluación de la confiabilidad de los instrumentos de medición de temperatura que componen el motor de combustión interna ubicado en el laboratorio de experimentos de la Universidad Antonio Nariño Sede Puerto Colombia.

3.1 Incertidumbre de medición

El resultado de un proceso de calibración y/o medición, en ningún caso es perfecto. Por tal motivo, existe una incertidumbre de medición que según el VIM [22] es un parámetro no negativo que caracteriza de forma razonable la dispersión de los valores atribuidos a un mensurando, para un nivel de confiabilidad determinado. La incertidumbre de medición es un concepto fundamental para la expresión del resultado de un mensurando [23], al punto que un resultado de medición es considerado incompleto si este parámetro no es informado [24].

La incertidumbre de medición, generalmente, engloba diversas componentes. Algunas pueden ser estimadas por una evaluación Tipo A (a partir de análisis estadísticos) y, otras, son estimadas por una evaluación Tipo B (caracterizada por la distribución de probabilidad asociada). Los siguientes tópicos auxiliarán en el esclarecimiento de estos conceptos fundamentales para el entendimiento de los resultados del proyecto de grado.

La metodología adoptada para la expresión de la incertidumbre de medición es estandarizada según los lineamientos de la **“Guía para la expresión de la incertidumbre**

de medición” [25]. Esta guía define las bases para el uso de las mediciones y sus incertidumbres asociadas. La Figura 3 ilustra un esquema del proceso estándar para la estimación de la incertidumbre de medición.

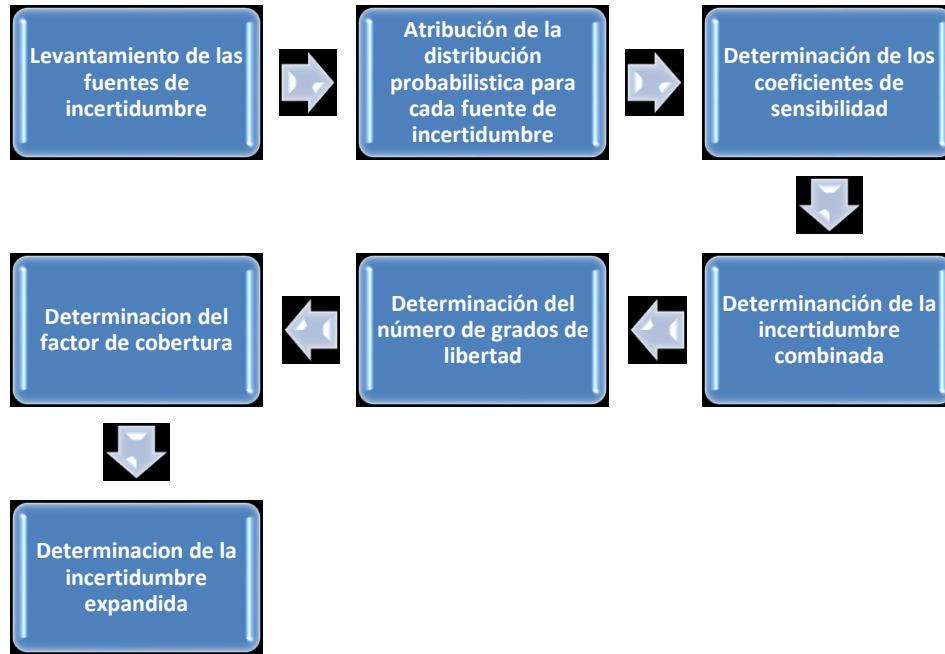


Figura 3 – Método de estimación de la incertidumbre de medición

Fuente: Adaptado de ISO GUM, 2008 [25].

3.2 Incertidumbre Tipo A

En general si una magnitud x que varía de forma aleatoria puede determinarse a través de una serie de mediciones independientes x_i bajo condiciones de repetibilidad¹. El mejor estimador del valor verdadero es el promedio aritmético de los datos experimentales:

$$\bar{x} = \frac{1}{n}(x_1 + x_2 + \dots + x_n) = \left(\frac{1}{n}\right) \sum_{k=1}^n x_k \quad (10)$$

Las mediciones x_k varían debido al hecho que las magnitudes de influencia (e.g.: humedad, temperatura ambiente, presión atmosférica, campos electromagnéticos) también están en

¹ Para las condiciones de repetibilidad se debe garantizar [22]: mismo procedimiento de medición, mismo operador, mismo instrumento de medición, mismas condiciones ambientales, mismo lugar y mediciones realizadas en intervalos cortos de tiempo.

constante variación. En la situación donde no se detecten variaciones considerables, es posible sea asociado a una deficiencia en la resolución del instrumento.

Para el caso de la varianza poblacional (σ^2) el mejor estimador es la varianza de la muestra (s^2), que puede ser calculada a partir de la Ecuación (11):

$$s^2(x_k) = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (x_k - \bar{x})^2 \quad (11)$$

La raíz cuadrada positiva de la varianza denota la desviación estándar (s) de los datos experimentales. Finalmente, la desviación estándar experimental $s(\bar{x})$, es decir, la incertidumbre Tipo A que está asociada a la repetibilidad del instrumento (u_A), puede ser calculada por la Ecuación (12):

$$s(\bar{x}) = u_A = \frac{s(x_k)}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{k=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (12)$$

3.3 Incertidumbre Tipo B

La incertidumbre Tipo B es aquella que no requiere de cálculos estadísticos, es decir, emplea información externa u obtenida por la experiencia. Esta incertidumbre puede ser tanto o tal vez más confiable que una evaluación Tipo A, especialmente cuando el tamaño de la muestra no es demasiado grande [26]. Esta información puede incluir:

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

3.4 Distribución rectangular

En diversos casos, puede ser posible estimar el límite superior e inferior para una dada magnitud de influencia. En esta situación, se puede afirmar: la probabilidad que el valor de la magnitud este comprendido entre dichos limites es igual a uno (1) o igual a 100%, consecuentemente, se asocia a cero (0) o a 0% la probabilidad que el valor de dicha magnitud se encuentre fuera del intervalo definido por tales límites. Dado el comportamiento aleatorio y desconocido de la magnitud de estudio dentro del intervalo definido –por el límite superior e inferior– se considera que la probabilidad de ocurrir un evento dentro de dicho intervalo está uniformemente distribuida [25]. Este concepto hace referencia a la distribución rectangular de probabilidad, conforme ilustrado en la Figura 4.

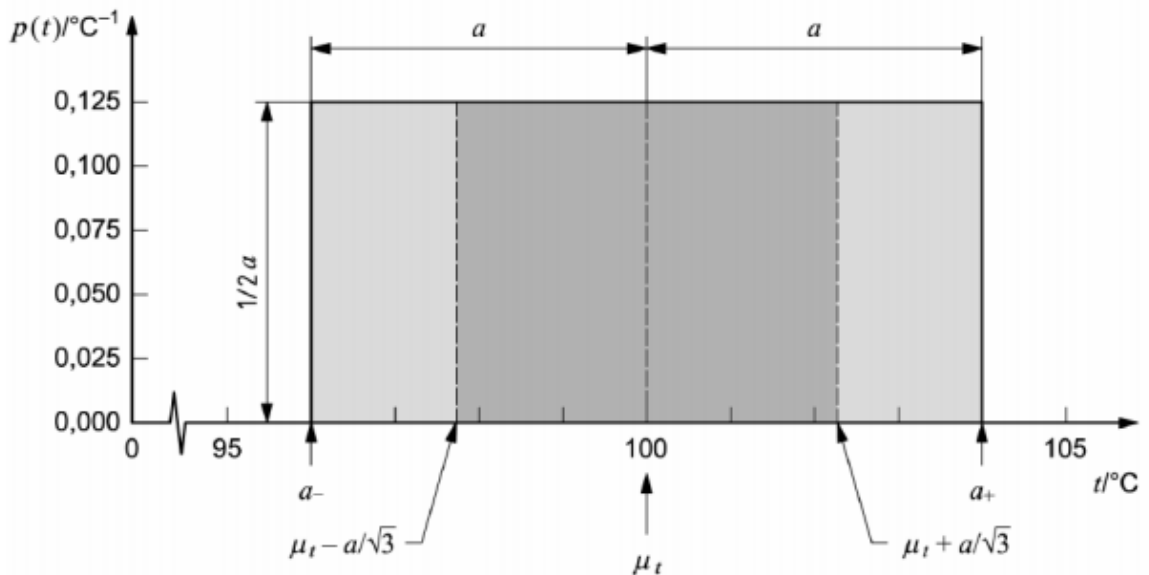


Figura 4 – Distribución rectangular de probabilidad

Fuente: ISO GUM, 2008 [25].

En la Figura 4, se tiene que la base del rectángulo (x) es definida por $2a$, dado que el área es unitaria, se deduce que la altura definida como $f(x)$ es denotada por:

$$f(x) = \frac{1}{2a} \tag{13}$$

A partir de la expresión anterior, a seguir se deduce un estimador para el cálculo de la incertidumbre cuando se asocia los datos experimentales a una distribución rectangular de probabilidad. La varianza de una variable aleatoria es definida por la Ecuación (14) y la desviación estándar puede ser calculada, en función del valor esperado de la distribución, $E(x)$, a partir de la Ecuación (15):

$$s^2(x) = E(x^2) - [E(x)]^2 \quad (14)$$

$$s(x) = \sqrt{E(x^2) - [E(x)]^2}. \quad (15)$$

Para el caso específico de una distribución rectangular, se tiene que su valor esperado es dado por la siguiente expresión [27]:

$$E(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} x \cdot f(x) dx = \int_0^{2a} x \cdot \frac{1}{2a} dx = \frac{1}{2a} \int_0^{2a} x dx = \frac{1}{2a} \cdot \frac{x^2}{2} \Big|_0^{2a} = a. \quad (16)$$

Calculándose el valor esperado de la variable aleatoria x^2 , se obtiene:

$$E(x^2) = \int_{-\infty}^{+\infty} x^2 \cdot f(x) dx = \int_0^{2a} x^2 \cdot \frac{1}{2a} dx = \frac{1}{2a} \int_0^{2a} x^2 \cdot dx = \frac{1}{2a} \cdot \frac{x^3}{3} \Big|_0^{2a} = \frac{4a^2}{3} \quad (17)$$

Sustituyendo los resultados de las Ecuaciones (16) y (17) en la Ecuación (15) y, realizándose las operaciones correspondientes, se obtiene una expresión que denota la desviación estándar asociada a una distribución rectangular de probabilidad, conforme la Ecuación (18):

$$s(x) = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (18)$$

En la expresión anterior, a representa un parámetro que puede ser atribuido a la resolución del instrumento dividida por dos (para el caso de instrumentos digitales). De esta forma, se confirma, basado en la teoría consagrada en la ISO GUM que es razonable asociar una distribución rectangular a la resolución de instrumentos digitales, tal como sucede en los sensores de temperatura del motor de combustión interna objeto de este proyecto de grado, cuyos indicadores contienen un *display* digital.

3.5 Distribución normal y t-student

La distribución normal, también conocida como Gaussiana, es un tipo de distribución de probabilidad para variables aleatorias continuas. Es la distribución más importante en los estudios estadísticos, pues modela una gran cantidad de fenómenos con alta precisión [28], e.g.: altura y peso de personas, nivel de lluvia en una región, altura de árboles en una floresta, datos de calibración de un instrumento, entre otros.

La Ecuación (19) denota la función de densidad de probabilidad $f(x)$ para una variable aleatoria continua x . El dominio de la variable aleatoria está definido en el intervalo dado por: $-\infty < x < +\infty$.

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \cdot e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad \therefore \sigma^2 > 0 ; \mu \in R \quad (19)$$

En la expresión anterior, σ^2 : denota la varianza de la población, cuyo mejor estimador es la varianza muestral, definida por la Ecuación (11); μ : denota la media de la población, cuyo mejor estimador es la media muestral, definido por la Ecuación (10).

La distribución normal es completamente caracterizada por su media y su desviación estándar. La media define el desplazamiento horizontal de la curva, mientras que la desviación estándar define la dispersión de los datos medidos (*i.e.*: el achatamiento de la curva). La Figura 5 ejemplifica la situación anteriormente descrita. Para el caso de la Figura 5a se muestran dos distribuciones que poseen la misma desviación estándar (en torno de 4,8), pero diferentes medias. Por el contrario, la Figura 5b ilustra la situación de dos distribuciones normales con medias iguales (en torno de 10), sin embargo, con varianzas diferentes (*i.e.*: incertidumbres diferentes).

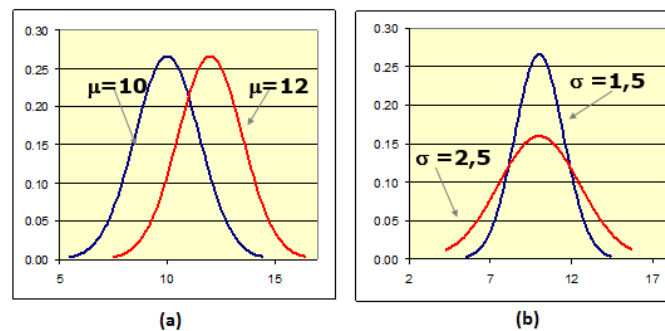


Figura 5 – Media y varianza de una distribución normal

Fuente: Castro (2016) [27]

Utilizándose una transformación de variable, es posible convertir cualquier variable aleatoria x a una distribución normal estándar z . Esta distribución z se caracteriza por seguir una distribución normal con media cero y varianza uno, *i.e.*: $N(\mu, \sigma^2) = N(0, 1)$. Los valores de z son tabulados y se encuentran en el Anexo A. La Ecuación (20) permite calcular la variable z :

$$z = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad (20)$$

La Figura 6 ilustra el área de probabilidad asociada a una desviación estándar (1σ), dos desviaciones estándar (2σ) y tres desviaciones estándar (3σ).

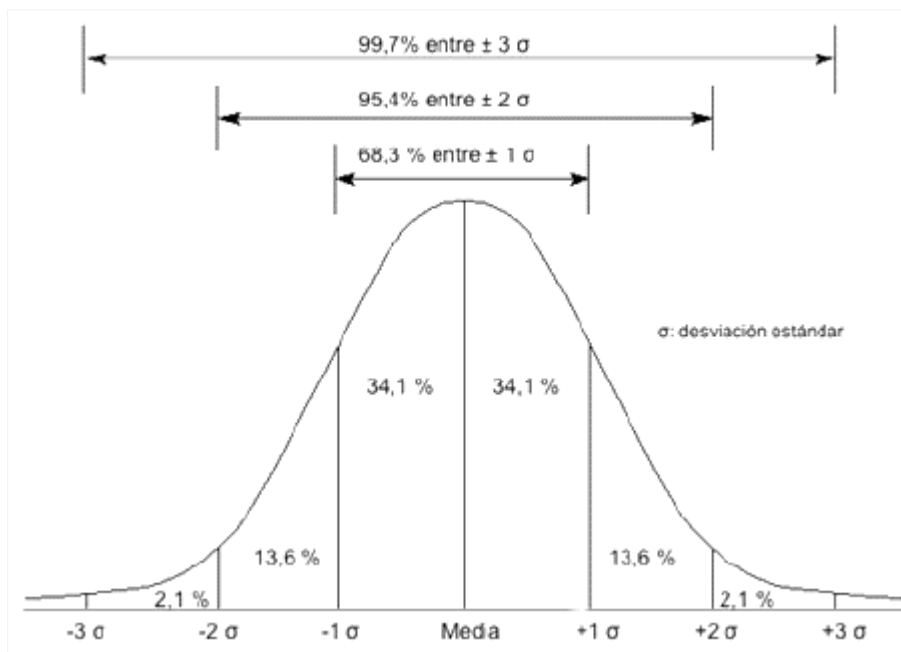


Figura 6 – Probabilidad asociada al área bajo la curva de una Dist. Normal estándar

Fuente: De Andrade (2012) [24]

Cuando el tamaño de la muestra es pequeño (*i.e.*: $n < 30$) es posible aproximar los datos experimentales de una muestra a una distribución de probabilidad *t-student*, cuyos valores también se encuentran tabulados y pueden ser encontrado en el Anexo B. Esta distribución tiene la particularidad que cuando los grados de libertad ($n - 1$) es aumentado, la curva característica se aproxima mucho más a aquella definida por una distribución normal estandarizada, tal como se puede observar en la Figura 7.

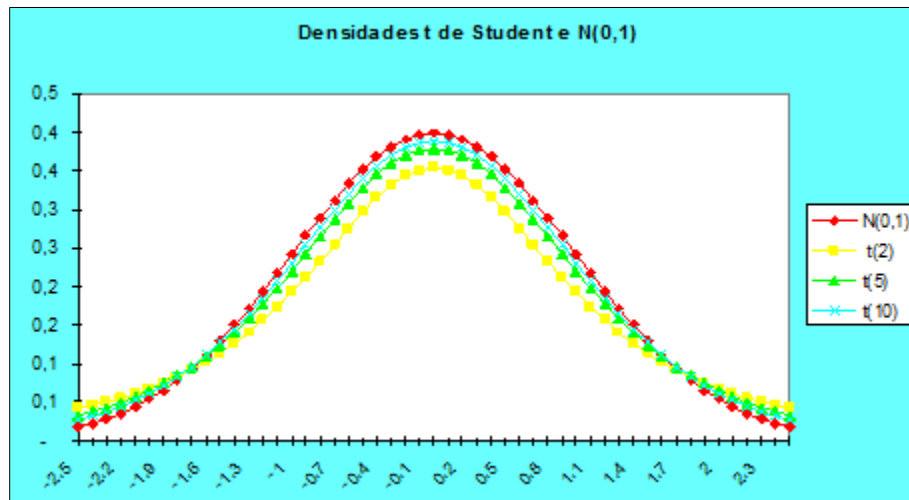


Figura 7 – Curva t-student aproximada a una Distribución Normal estándar

Fuente: Castro (2016) [27]

En la Figura 7, la curva amarilla presenta 2 grados de libertad, la curva verde presenta 5 grados de libertad, la curva azul posee 10 grados de libertad y, finalmente, la curva roja caracteriza la distribución normal estándar N (0, 1).

3.6 Incertidumbre combinada

La incertidumbre estándar combinada es la incertidumbre estándar del resultado de una medición, que se obtiene a partir de los valores de otras magnitudes [26]. Este parámetro es igual a la raíz cuadrada positiva de una suma de términos, siendo estos términos la varianza y la covarianza de dichas magnitudes, ponderadas de acuerdo como varía el resultado de la medición por cambios en estas magnitudes.

La incertidumbre combinada, expresada como $u_c(y)$, depende de las incertidumbres $u(x)$, de cada uno de los estimados de entrada. Cada $u(x)$ es una incertidumbre estándar evaluada como Tipo A o Tipo B, según el siguiente modelo matemático:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \tag{21}$$

La $u_c(y)$ depende también de que tanto influye x sobre y . Por ejemplo, si x aparece elevada a la cuarta potencia en la función f influirá mucho más que si sólo estuviera elevada a la primera potencia. Por otro lado, el parámetro que determina que tanto influye x_i sobre y es

definido como el coeficiente de sensibilidad, c_i . Matemáticamente, c_i es calculado como la derivada parcial de la función f respecto de x_i , es decir:

$$c_i = \frac{\partial f}{\partial x_i} \quad (22)$$

Posteriormente, se suma cuadráticamente todas estas:

$$u_c^2(y) = [c_1 \cdot u(x_1)]^2 + [c_2 \cdot u(x_2)]^2 + \dots + [c_n \cdot u(x_n)]^2 \quad (23)$$

La $u_c(y)$ es una desviación estándar combinada que caracteriza, para un nivel de probabilidad de 68,27% (i.e.: 1σ), la dispersión de los valores que pueden atribuirse al resultado de una medición. La Ecuación (23) puede ser resumida en la siguiente expresión:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) \quad (24)$$

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

3.7 Factor de cobertura

El factor de cobertura (k) es un coeficiente por el cual la incertidumbre estándar combinada es multiplicada para obtenerse la incertidumbre de medición expandida [22]. El valor del factor de cobertura es seleccionado con base al nivel de confianza requerido. Este parámetro, generalmente, se encuentra entre 2 y 3. Entretanto, para aplicaciones especiales, puede estar fuera de este rango [25]. De esta forma se tiene que: $k=1$, para 68,27% de confianza; $k=2$, para 95,45% de confianza; $k=3$, para 99,73% de confianza.

3.8 Incertidumbre expandida

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

$$U = k \cdot u_c(y) \quad (25)$$

El resultado de la medición se expresa como:

$$Y = y \pm U \quad (26)$$

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

3.9 Incertidumbre asociada a la interpolación polinomial

En el proceso de calibración de instrumento de medición no es posible conocer, experimentalmente, el error y la incertidumbre en todo el rango del instrumento. Para esto, se necesitaría un número infinito de mediciones, lo cual es inviable desde el punto de vista práctico. Por esta razón, resulta conveniente especificar un polinomio interpolador que permita estimar, matemáticamente, el valor real de la medición para cualquier indicación del instrumento, así como el error y la incertidumbre asociada. Para esto, es necesario evaluar diversos polinomios y encontrar el que mejor representa la naturaleza física del problema.

Un polinomio de grado n (Ecuación 27), es usualmente utilizado para correlacionar el valor leído por el instrumento contra el respectivo valor indicado por el patrón, para cada experimento de la calibración realizada. El polinomio que mejor representa la naturaleza física de la calibración es seleccionado entre aquellos que ofrecen la menor incertidumbre asociada a la interpolación polinomial, también llamada como: *Incertidumbre del Ajuste*.

$$y(x_i) = a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot x^2 + a_3 \cdot x^3 + \dots + a_n \cdot x^n \quad (27)$$

En la expresión arriba, x : denota el resultado de la medición indicada por el instrumento y $y(x_i)$ el valor ajustado por el polinomio, valor que relaciona la lectura del instrumento al valor dado por el patrón.

Los coeficientes $a_0, a_1 \dots a_n$ son determinados aplicando el método de los mínimos cuadrados ordinarios (OLS, del inglés *Ordinary Least Squares*), *i.e.*: resolviendo el sistema matricial dado por la Ecuación (28). El trabajo algebraico de resolver la Ecuación (28)

puede, sin embargo, ser evitado haciendo uso de la herramienta estadística disponible en el software de Excel.

$$\begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n x_i^0 & \sum_{i=1}^n x_i^1 & \dots & \sum_{i=1}^n x_i^n \\ \sum_{i=1}^n x_i^1 & \sum_{i=1}^n x_i^2 & \dots & \sum_{i=1}^n x_i^{n+1} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \sum_{i=1}^n x_i^n & \sum_{i=1}^n x_i^{n+1} & \dots & \sum_{i=1}^n x_i^{2n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n x_i^0 \cdot y_i \\ \sum_{i=1}^n x_i^1 \cdot y_i \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^n x_i^n \cdot y_i \end{bmatrix} \quad (28)$$

No obstante, un polinomio del grado 1 ($n = 1$) puede constituirse en una buena representación de la naturaleza física de la calibración de algunos tipos de termómetros y sensores de temperatura digitales, la elección de polinomios de grado superior puede resultar en menores incertidumbres del ajuste. Por esta razón, se considera una buena práctica de calibración probar al menos tres grados de polinomio para definir el que ofrece la menor incertidumbre del ajuste y, por consiguiente, la menor incertidumbre asociada a la medición. Así, una vez determinados los coeficientes para cada polinomio, se calculan los valores ajustados para cada polinomio; y, por lo que se refiere, sucesivamente, $n = 1$; $n = 2$ y $n = 3$ en la Ecuación (27) para definir el polinomio y en la Ecuación (28) para calcular los coeficientes.

La aplicación de un polinomio (dicho polinomio interpolador de ajuste) permite: (i) corregir en línea los resultados experimentales medidos por el instrumento de medición; (ii) disminuir el error sistemático, que es inherente al proceso de medición; (iii) estimar los valores ajustados para cualquier indicación del instrumento, siempre que esté dentro del rango de su calibración y (iv) reducir el error total asociado a la medición². A pesar de estas ventajas de utilizar el polinomio para corregir el valor indicado por el instrumento, es necesario tener en mente que su uso introduce una nueva fuente de incertidumbre, este nuevo parámetro corresponde a la incertidumbre del ajuste.

² $Error\ Total = |Error\ sistemático| + |Incertidumbre\ Expandida| \leq (Tolerancia\ del\ proceso)$

El valor de esta incertidumbre del ajuste se calcula (para cada polinomio evaluado) aplicando la Ecuación (29).

$$u_s = \sqrt{\left(\frac{1}{n-c}\right) \cdot \sum_{i=1}^n [y(x_i) - y_i]^2} \quad (29)$$

En la ecuación arriba:

- u_s : denota la incertidumbre del ajuste
- $y(x_i)$: denota el valor ajustado por el polinomio
- y_i : denota el valor indicado por el patrón
- n : denota el número de puntos experimentales de la calibración
- c : denota o número de coeficientes del polinomio siendo evaluado

En la secuencia, (i) se elige el polinomio interpolador asociado a la menor incertidumbre del ajuste y (ii) se determina el factor de cobertura *t-student* t (para un nivel de confianza del 95,0%), a partir de la distribución de probabilidad *t-student* y del número de grados de libertad (φ), dado por la Ecuación (30):

$$\varphi = n - c \quad (30)$$

En esta ecuación, n denota el número de puntos experimentales de la calibración y c el número de coeficientes estimados por el polinomio.

4. Diseño metodológico

El Laboratorio de Experimentos de la Universidad Antonio Nariño posee un motor de combustión de interna Yamaha EF2600D (Figura 8), el cual es objeto de estudio en este proyecto de grado. La

Tabla 1 presenta las características técnicas del motor y del generador.

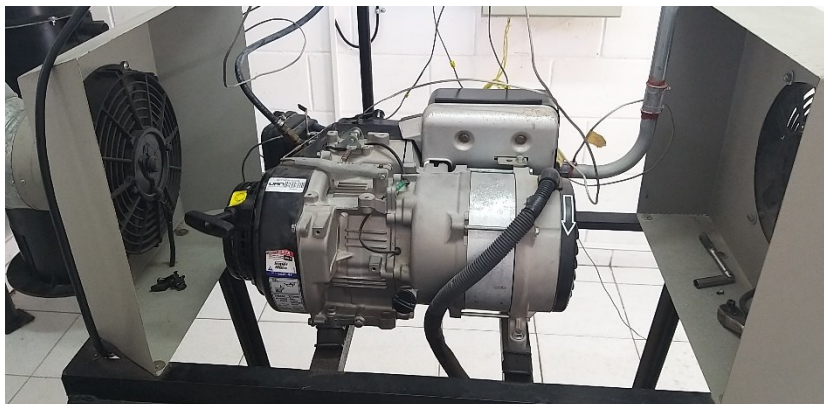


Figura 8 – Motor de Combustión Interna de la UAN-Sede Puerto Colombia
Fuente: Autoría propia

Tabla 1 – Características técnicas del motor-generator Yamaha

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

Fuente: Manual YAMAHA EF2600D

Para contextualizar y conocer el funcionamiento del motor de combustión interna (sistema motor-generator), éste se compone 14 partes, conforme ilustrado en la Figura 9.

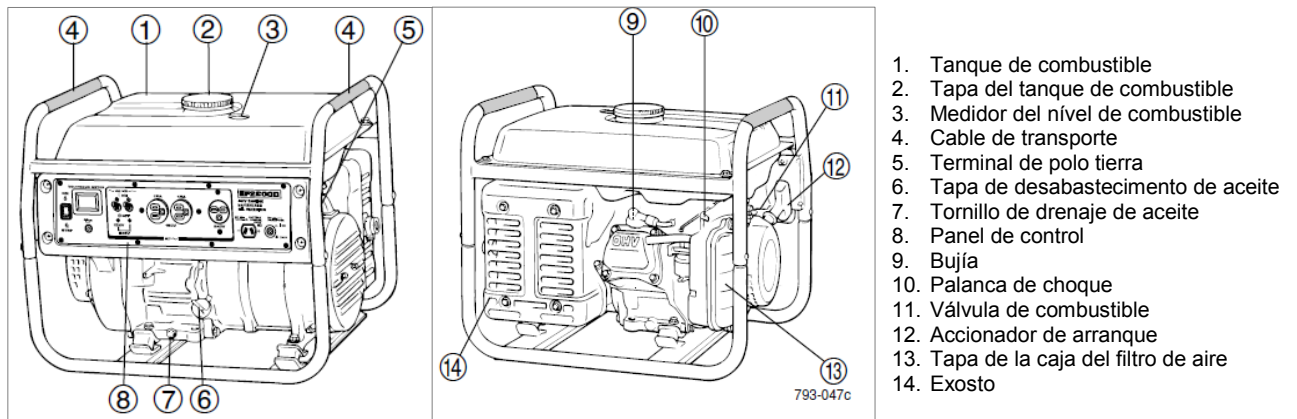


Figura 9 – Partes del Motor de Combustión Interna

Fuente: Manual YAMAHA EF2600D

Con relación al panel de control (parte 8), controla el sistema eléctrico del motor. La Figura 10 presenta un plano de detalle, destacando siete partes de este sistema

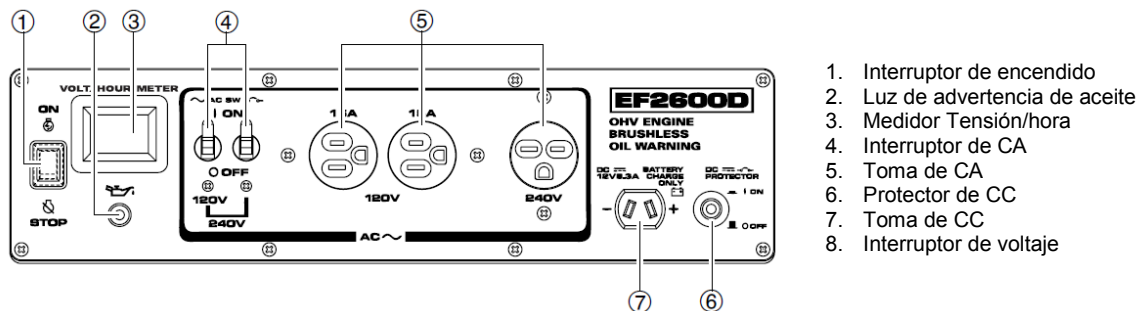


Figura 10 – Panel de Control del Motor de Combustión Interna

Fuente: Manual YAMAHA EF2600D

Una vez caracterizado el motor, así como sus partes, a seguir se presenta el diseño metodológico realizado. El desarrollo del presente proyecto se apoyó 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, se realizó una inspección previa para conocer los componentes mecánicos que debían ser reemplazados y/o realizarles un mantenimiento preventivo. En relación con el cumplimiento de los objetivos, se tiene:

Objetivo específico #1: programar un sistema de automatización PLC (Programmable Logic Controller) que permita el control de temperatura de los procesos asociados al motor de combustión interna.

- **Etapas 1:** Programación del sistema PLC para el control de temperatura

En esta etapa se realizó la programación del sistema PLC para el control de temperatura que permita la generación de alarmas por sobrecalentamiento de los distintos sistemas, además de la intervención automática del ventilador asociado al sistema de refrigeración por aire. Una identificación clara de los sensores de temperatura fue definida, así como las temperaturas de operación de cada sistema del motor, para su posterior configuración en los controladores electrónicos de temperatura. Para esta actividad, se evaluó la operatividad de los controladores de temperatura, así como la fuente de energía del sistema PLC, con el fin de identificar cuales componentes deben ser reemplazados por fallas en su funcionamiento.

Objetivo específico #2: *Elaborar una herramienta de cálculo en Excel que permita evaluar la confiabilidad metrológica del sistema de medición de temperatura en el motor de combustión interna.*

- ***Etap 2: Elaboración de una planilla de Excel para la calibración del sistema de medición de temperatura basada en la norma internacional NT-VVS-103:1994 para instrumentos de comparación directa***

En esta etapa se realizó la elaboración de una planilla de calibración con el auxilio de la herramienta Excel. Esta planilla será de utilidad para análisis de los resultados de la calibración *in-situ* del sistema de medición de temperatura asociado al motor de combustión interna. El sistema es conformado por un sensor de temperatura Tipo K y un indicado digital Autotronic con resolución ajustable de 1 °C. Para la actividad experimental (a ser desarrollada en trabajos futuros. En este proyecto no fue posible realizarla debido al confinamiento obligatorio como consecuencia del pandemia COVID-19) será necesario el uso de un bloque térmico que permita una homogeneidad térmica máxima certificada de 0,1 °C. Además, debe ser utilizado un termómetro digital patrón con una resolución máxima de 0,1 °C. El sistema termómetro-bloque debe haber sido calibrado por un laboratorio de metrología acreditado por la ONAC (Organismo Nacional de Acreditación de Colombia) con el objetivo de garantizar la trazabilidad metrológica al sistema internacional de unidades. En el desarrollo de los experimentos deben ser realizadas 11 medidas a lo largo del rango de indicación del instrumento, realizando 3 repeticiones en cada punto, acorde con la norma NT VVS 103, "*Thermometers, Contact, Direct Reading: Calibration*": 1994-09. De esta forma se totalizará, por lo menos, 33 puntos experimentales para cada sensor. Considerando 6 sensores, finalmente se espera la obtención de 198 puntos experimentales para evaluar la confiabilidad metrológica de los procesos de medición de temperatura. En el tratamiento estadístico

de datos se espera la obtención de polinomios interpoladores de ajuste para determinar la real temperatura de cada proceso, además de conocer el error y la incertidumbre expandida a cada proceso de medición de temperatura dentro de un nivel de confiabilidad de 95,0%. El procedimiento aplicado, en la elaboración de la herramienta de cálculo en Excel para la estimación de la incertidumbre, seguirá las directrices de la Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medición (GUM, 2008).

Objetivo específico #3: *Elaborar una herramienta de cálculo en Excel que permita evaluar la confiabilidad metrológica del sistema gravimétrico utilizado para la medición del consumo específico de combustible.*

• **Etapa 3: Elaboración de una planilla de Excel para la calibración del sistema gravimétrico para la medición del consumo específico de combustible**

En esta etapa se realizará la elaboración de una planilla Excel que permita evaluar la confiabilidad metrológica de un sistema gravimétrico para la medición del consumo combustible específico. Este sistema, actualmente, no se encuentra instalado en el motor de combustión interna. De esta forma, en trabajos futuros, se debe proceder a adquirir una balanza digital de rango igual a 30,0 kg y una resolución de 0,1 kg. Posteriormente, esta balanza debe ser calibrada *in-situ* utilizando masas patrones de clase de exactitud F1 y M1, siguiendo el procedimiento descrito en la guía publicada en 2009 por el Sistema de Interamericano de Metrología (SIM). Las masas patrón debe estar certificada a través de un laboratorio de metrología acreditado por la ONAC. Con el propósito de aumentar la confiabilidad metrológica (i.e.: reducir la incertidumbre asociada a la medición de masa) se espera obtener por lo menos 60 puntos experimentales a lo largo del rango de indicación de la balanza (30 para carga ascendente y 30 para carga descendente). Cada punto experimental, tendrá una repetibilidad de 10 puntos, conforme sugerido por la Guía SIM, totalizando así 600 puntos experimentales para evaluar la confiabilidad metrológica del sistema gravimétrico para la medición del consumo específico de combustible. El tratamiento estadístico de datos, curva de calibración, cálculo de errores e incertidumbre, será posible a partir de la planilla que será elaborada en el presente proyecto de grado.

5. 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.

5.1 Programación del sistema de automatización PLC

El tablero de control posee un sistema de protección y encendido, un sistema de monitoreo y protección del generador y un sistema de encendido de ventiladores, el cual permite controlar las variables de temperatura del generador, temperatura gasolina y temperatura bujía. Sin embargo, se encontró que el sistema podría ser mejorado a partir de la programación de un nuevo sistema de automatización PLC. Este fue uno de los primeros desafíos a superar en el desarrollo del proyecto. La Figura 11 muestra el sistema de cableado original en el tablero de control.

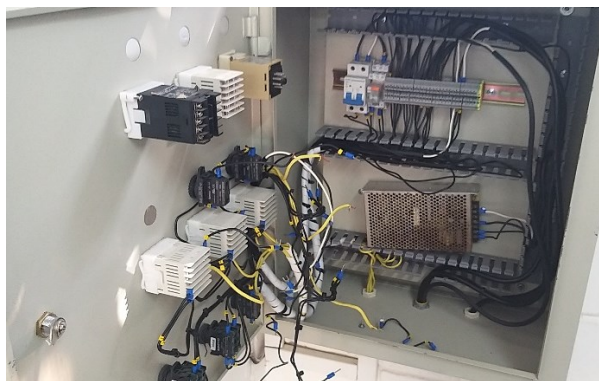


Figura 11 – Tablero de control original del motor de combustión interna
Fuente: Autores

Se puede apreciar que el motor de combustión interna no poseía un sistema de automatización y control. Consecuentemente, los sensores para la medición de temperatura y el sistema de refrigeración –dado por la activación y desactivación automática del ventilador– no funcionaban de forma adecuada.

Para atender este primer desafío el primer paso fue verificar el desempeño de la fuente de poder. Esto fue posible mediante el uso de un multímetro (Figura 12a). Seguidamente se procedió a realizar el diseño y la instalación del sistema de cableado PLC (Figura 12b) y finalmente se consolidó un nuevo diseño del sistema de automatización PLC (Figura 12c).

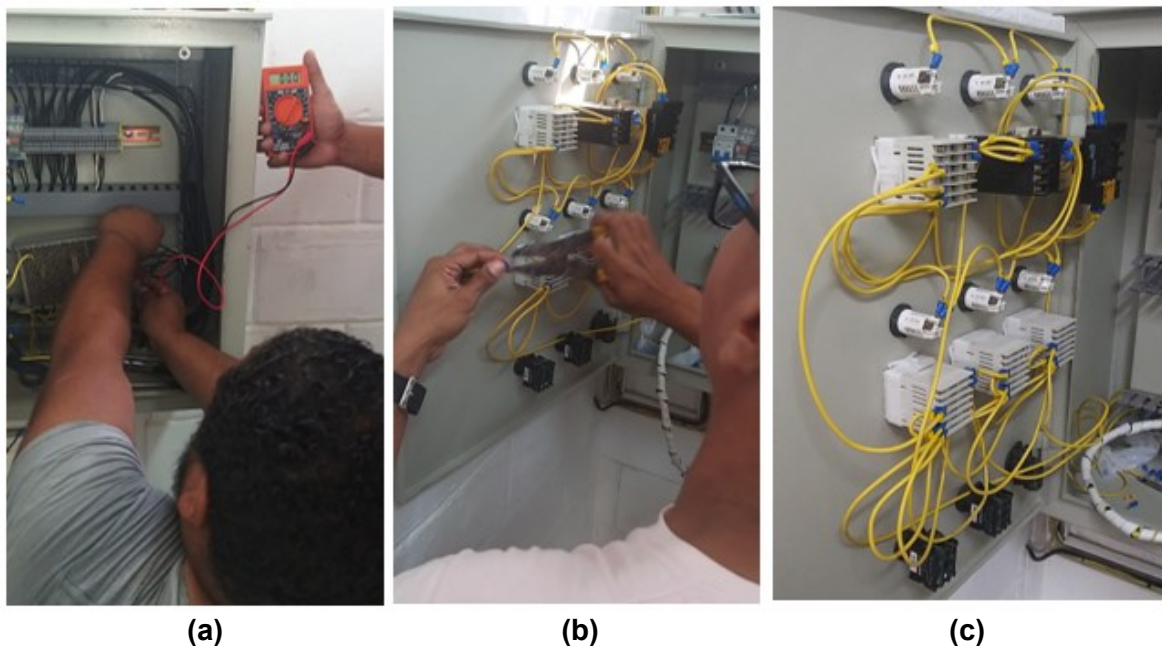


Figura 12 – Implementación del sistema de automatización PLC

Fuente: Autores

La programación del nuevo sistema de automatización PLC permite la activación del sistema de refrigeración mediante el encendido del ventilador cuando la temperatura del motor alcanza los 80 °C. Este valor es regulable y autoprogramable en los indicadores digitales de temperatura con el propósito de evaluar, experimentalmente, el desempeño del sistema de refrigeración del motor. Adicionalmente, el nuevo sistema de automatización PLC permite la medición instantánea de los seis sensores de temperatura del motor, i.e.: temperatura de admisión, compresión, combustión, escape, combustible y aceite. La elaboración del plano eléctrico diseñado (Figura 13) permite una lectura simple y una interpretación detallada del nuevo sistema de automatización PLC.

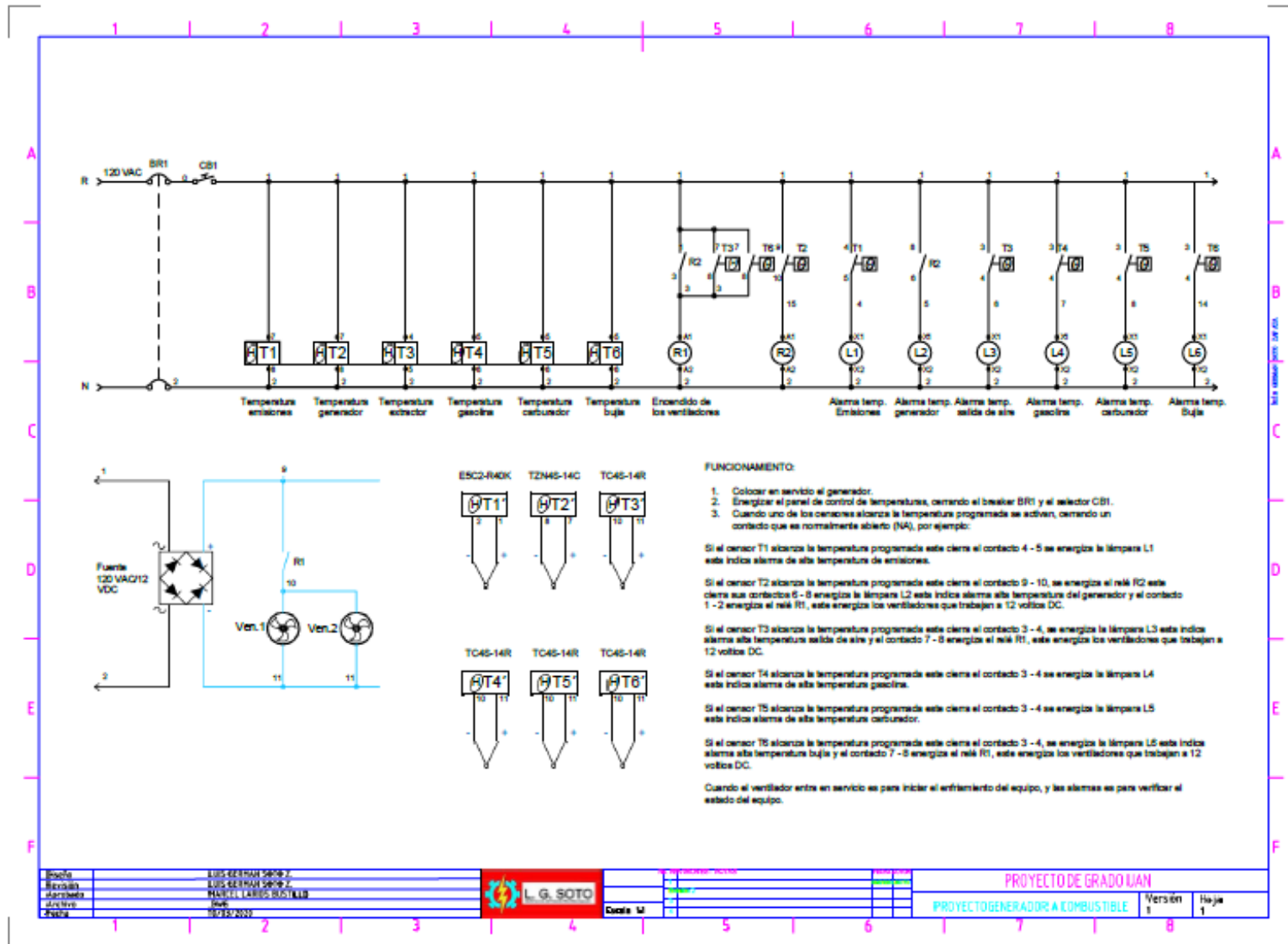


Figura 13 – Plano Eléctrico del sistema de automatización PLC
Fuente: Autores

Para el desarrollo de este plano, se consideraron los estándares actualizados por organizaciones internacionales, con el fin de estar en sintonía con el contexto mundial. De esta forma, el plano eléctrico, mostrado en la figura anterior, fue construido con el auxilio del software AutoCAD 2019. Este plano está representado con una línea R (Relé) y una línea N (Neutro) que inician el recorrido de tensión de 120 VAC (Voltaje de Corriente Alterna). Con el fin de suministrarle energía e iniciar el funcionamiento contamos con un breaker representado en el plano con las siglas BC1. Se cuenta, también, con un selector de tipo CA4 de cuerpo compacto, cilíndrico y carátula de aproximadamente 30 mm que soporta un aproximado de 10Amp y de un máximo de 440/300 Voltaje Nominal.

Después de encendido el motor, se notará que los transmisores de temperaturas del Panel de control inician mostrando la temperatura de cada termocupla (Figura 13). En total, se cuentan con 6 Termocuplas (sensores de temperatura) instaladas en lugares estratégicos del motor, en el plano están representadas con la letra (T) las Termocuplas:

- **T1:** Es la primera línea la cual está instalada en la salida de Emisiones del Motor. Esta termocupla lleva una línea hacia el tablero de control donde se conecta con un controlador de temperatura analógico de referencia E5C2 y la lámpara 1 (L1) el cual es un controlador de temperatura compacto. En este caso se configuró solo para informar la temperatura de las Emisiones emitidas por la combustión del Motor. La lámpara o indicador no se configuró, pero se dejó conectado en caso de que en un futuro se desee configurar este controlador y el indicador de encendido sea la lámpara.
- **T2:** La segunda línea es la Termocupla del generador, quizás la más importante por lo que está asociada directamente al motor objeto de estudio en este proyecto. Esta Termocupla contiene una línea hacia el panel de control. Está conectada en el segundo Controlador de Temperatura de referencia (TZN4S-14C) el cual es un controlador digital configurado según manual para que cuando la termocupla alcance una temperatura mayor a 45 °C abra el (R2) y a su vez el (R1) representados en el plano siendo los Relé 1 y Relé 2, cuando estos abren entran en servicio dos ventiladores o extractores de Calor representados en el plano como Vent.1 y Vent. 2 estos funcionan gracias a una fuente de poder instalada en el panel de control transformando la tensión de 140V~AC a 12V~DC representada en el plano como (Fuente120 VAC/12VDC), los ventiladores estarán encendidos hasta

cuando la temperatura baje a la temperatura configurada en el controlador digital debajo de 40°C.

- **T3:** la tercera línea representada en Termocupla 3 instalada en el ducto de los extractores de aire la cual va interconectada en el tablero de control con el tercer Controlador de referencia TC4S-14R y (L3) Lámpara 3. En esta se suministra el calor del aire que es ventilado por los extractores Vent. 1 y Vent. 2. Este controlador cierra el contacto 3 y 4 para encender la Lámpara cuando la temperatura alcanza más de 95°C y a su vez se energiza el contacto 1 y 2 del Relé 1, colocando en servicio los Ventiladores Vent. 1 y Vent. 2. Estos ventiladores estarán en servicio hasta que la temperatura baje a menos de 80°C y también se apagará la Lámpara (L3).
- **T4:** la cuarta línea representa la Termocupla 4 y está instalada en la temperatura del combustible, en este caso gasolina. La línea va hacia el tablero de control, aquí se conecta al controlador de temperatura de referencia TC4S-14R y la lámpara 4 (L4). Este controlador identifica la temperatura en que se mantiene el combustible al ingresar al motor.
- **T5:** la quinta línea representa la Termocupla 5 y está instalada en el carburador del motor, que a su vez se conecta por medio de una línea al panel de control con un transmisor digital de referencia TC4S-14R y la lámpara (L5). Este controlador mide la temperatura del carburador del motor.
- **T6:** En esta sexta línea se representa la Termocupla 6. Esta termocupla está instalada en la bujía del motor. Cuenta con una línea hacia el panel de control donde se encuentra conectada con un transmisor de referencia TC4S-14R y la lámpara (L6). Cuando la bujía alcanza una temperatura superior a 95°C cerrará el contacto 3 y 4 con lo que energizará la lámpara L6 y cerrará los contactos 7 y 8 del Relé 1 para poner en servicio los Vent. 1 y Vent. 2, estos quedaran en servicio hasta que la temperatura sea inferior a 80°C.

Colocando en servicio el tablero de Control se procede a poner en funcionamiento el sistema Motor-Generador EF2600D del laboratorio de experimento. En este punto, vale la pena resaltar que, en primera instancia, se debe inspeccionar de manera visual que todo el conjunto esté en completo orden. Por ejemplo, se verifica que se cuente con combustible suficiente (Gasolina) y que la respectiva llave de paso este abierta. Además, se debe

verificar el nivel de aceite. En caso de que el nivel de aceite sea inferior al nivel mínimo aceptado, se debe suministrar aceite hasta que quede lo suficiente en su depósito. Caso contrario, si no se cuenta con el aceite suficiente puede que no de encendido el motor. Finalmente, siguiendo instrucciones del manual se debe realizar el encendido del motor “tirando” de la empuñadura, una vez que no se cuenta con arranque eléctrico.

Es importante destacar que en el motor se debe controlar las temperaturas por medio de la medición de las Termocuplas, ya que un motor que funciona con temperaturas superiores a las recomendadas por el fabricante hará que el motor se vea afectado en su eficiencia neta de forma severa. El aumento de temperatura por cualquier motivo sea por perdidas eléctricas o mecánicas estarán ligadas al servicio del motor. Un motor que trabaje de manera balanceada refiriéndose a la temperatura de trabajo será un motor que tiene larga vida útil, menores problemas de operación en sus funciones y así obtendremos menos paradas algo que suma menos gastos más producción.

Algunos de estas recomendaciones de gran importancia son:

- No utilizar equipos que emitan altas temperaturas cerca del motor
- Mantener limpias las carcasas del motor, eliminar polvo, grasa, líquidos que no hagan parte del motor ya que interfieren en la transferencia de calor de la maquina al medio ambiente.
- Mantener el motor al día con su mantenimiento, cambio de aceite y rodamientos. Lo necesario para que el motor trabaje de manera correcta.
- Conservar limpio los ventiladores acoplados en los extremos del motor.

5.2 Herramienta para evaluar la confiabilidad del sistema de medición de temperatura

Con el auxilio de Microsoft Excel fue posible desarrollar una herramienta de cálculo para evaluar la confiabilidad metrológica del sistema de medición de temperatura asociado al motor de combustión interna. Con esta herramienta será posible, de forma experimental, analizar los datos de la calibración de los sensores de temperatura de forma simultánea. De esta forma, se facilita el análisis de los resultados y, adicionalmente, obtener resultados confiables de los parámetros térmicos asociados al motor de combustión interna. Vale la

pena resaltar que, con el propósito de priorizar la validación de la planilla desarrollada, fueron utilizados datos experimentales disponibles en la literatura especializada [29-30]. En ese orden de ideas, a seguir se presentará el paso a paso del uso de las planillas y los datos experimentales mostrados, disponibles en las referencias [29-30], así como los resultados de los mismos. Con esto, se muestra la robustez de la herramienta de cálculo para el análisis simultáneo de los datos de calibración de seis sensores de temperatura.

En primer lugar, se cuenta con una sección para incluir hasta 30 puntos experimentales de calibración, así como una columna para registrar la hora en que el punto fue obtenido. Esto permitirá, en un determinado momento, aplicar la teoría de transferencia de calor en condición transitoria y realizar análisis más profundo del sistema de medición. Seis sensores de temperatura son analizados de forma simultánea y sus valores puede ser incluidos de la misma forma. Además, se cuenta con dos columnas para tomar las variaciones en la medición de temperatura del patrón y, posteriormente, se calcula la media y la desviación estándar del patrón de medición. La Tabla 2 documenta la sección de registro de datos.

Tabla 2 – Registro de los datos de la calibración

No Puntos	Hora	S1	S2	S3	S4	S5	S6	Temperatura del Patrón de Medición			
		Temperaturas indicadas por los sensores									
		T ₁	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	°C
1	3:56:09 p. m.	7,1	7,0	7,2	6,6	6,5	6,6	6,1	6,3	6,2	0,1414
2	4:00:00 p. m.	9,4	9,3	9,5	8,8	8,7	8,8	8,5	8,5	8,5	0,0000
3	4:09:40 p. m.	11,8	11,6	11,8	11,2	11,1	11,2	10,7	10,9	10,8	0,1414
4	11:07:04 a. m.	14,3	14,1	14,4	13,7	13,6	13,7	13,1	13,3	13,2	0,1414
5	4:16:50 p. m.	14,7	14,6	14,8	14,1	14,0	14,1	13,8	13,8	13,8	0,0000
6	11:13:28 a. m.	16,0	15,8	16,1	15,4	15,3	15,4	14,9	14,9	14,9	0,0000
7	11:18:05 a. m.	16,4	16,3	16,5	15,8	15,7	15,7	15,3	15,4	15,4	0,0707
8	4:23:58 p. m.	16,5	16,3	16,6	15,9	15,8	15,9	15,4	15,5	15,5	0,0707
9	4:30:36 p. m.	19,4	19,3	19,5	18,8	18,7	18,8	18,5	18,5	18,5	0,0000
10	4:39:35 p. m.	21,6	21,5	21,7	21,0	20,9	21,0	20,5	20,6	20,6	0,0707
11	11:26:20 a. m.	23,4	23,3	23,5	22,8	22,7	22,8	22,2	22,3	22,3	0,0707
12	4:43:51 p. m.	24,2	24,0	24,3	23,6	23,5	23,5	23,1	23,2	23,2	0,0707
13	4:50:09 p. m.	26,8	26,6	26,8	26,1	26,0	26,1	25,6	25,7	25,7	0,0707
14	11:46:10 a. m.	26,8	26,6	26,9	26,2	26,1	26,1	25,7	25,7	25,7	0,0000
15	11:56:35 a. m.	31,3	31,1	31,3	30,6	30,5	30,6	30,1	30,1	30,1	0,0000
16	4:54:47 p. m.	31,1	31,0	31,3	30,5	30,4	30,5	30,1	30,1	30,1	0,0000
17	12:09:01 p. m.	36,3	36,1	36,3	35,6	35,5	35,6	35,0	35,0	35,0	0,0000
18	12:17:00 p. m.	39,2	39,1	39,3	38,6	38,5	38,6	38,0	38,0	38,0	0,0000
19	12:26:14 p. m.	41,2	41,1	41,3	40,6	40,5	40,6	40,0	40,0	40,0	0,0000
20	12:31:09 p. m.	41,2	41,1	41,4	40,6	40,5	40,6	40,0	40,0	40,0	0,0000
21	5:07:31 p. m.	41,2	41,0	41,3	40,5	40,5	40,5	40,0	40,0	40,0	0,0000
22	12:51:25 p. m.	46,3	46,1	46,2	45,6	45,5	45,6	45,0	45,0	45,0	0,0000
23	1:02:10 p. m.	49,3	49,1	49,3	48,6	48,5	48,6	48,0	48,0	48,0	0,0000
24	5:20:20 p. m.	51,3	51,1	51,3	50,6	50,5	50,5	50,0	50,0	50,0	0,0000
25	1:15:39 p. m.	51,3	51,1	51,5	50,6	50,5	50,6	50,1	50,1	50,1	0,0000
26	1:19:14 p. m.	56,3	56,1	56,3	55,6	55,5	55,6	55,0	55,1	55,1	0,0707
27	5:32:31 p. m.	61,3	61,1	61,3	60,6	60,5	60,6	60,0	60,0	60,0	0,0000
28	1:23:44 p. m.	61,3	61,1	61,3	60,7	60,6	60,6	60,1	60,1	60,1	0,0000
29	1:29:12 p. m.	66,4	66,2	66,3	65,6	65,6	65,7	65,1	65,2	65,2	0,0707
30	1:34:38 p. m.	71,4	71,2	71,2	70,7	70,6	70,6	70,2	70,1	70,2	0,0707

Fuente: Autores

Seguidamente, se realiza el cálculo del error sistemático no ajustado (Tabla 3). Este valor corresponde a la diferencia entre el valor indicado por el instrumento y el valor medio leído

en patrón de medición. Este error sistemático no ajustado el calculado para cada uno de los seis sensores de temperatura.

Tabla 3 – Cálculo del error sistemático no ajustado

Error sistemático (No Ajustado)					
T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆
S1	S2	S3	S4	S5	S6
E ₁	E ₂	E ₃	E ₄	E ₅	E ₆
°C	°C	°C	°C	°C	°C
0,9	0,8	1,0	0,4	0,3	0,4
0,9	0,8	1,0	0,3	0,2	0,3
1,0	0,8	1,0	0,4	0,3	0,4
1,1	0,9	1,2	0,5	0,4	0,5
0,9	0,8	1,0	0,3	0,2	0,3
1,1	0,9	1,2	0,5	0,4	0,5
1,1	0,9	1,2	0,4	0,3	0,3
1,1	0,9	1,2	0,5	0,4	0,5
0,9	0,8	1,0	0,3	0,2	0,3
1,1	0,9	1,2	0,4	0,3	0,4
1,2	1,1	1,3	0,6	0,4	0,6
1,1	0,9	1,2	0,5	0,4	0,4
1,2	1,0	1,2	0,5	0,4	0,5
1,1	0,9	1,2	0,5	0,4	0,4
1,2	1,0	1,2	0,5	0,4	0,5
1,0	0,9	1,2	0,4	0,3	0,4
1,3	1,1	1,3	0,6	0,5	0,6
1,2	1,1	1,3	0,6	0,5	0,6
1,2	1,1	1,3	0,6	0,5	0,6
1,2	1,1	1,4	0,6	0,5	0,6
1,2	1,0	1,3	0,5	0,5	0,5
1,3	1,1	1,2	0,6	0,5	0,6
1,3	1,1	1,3	0,6	0,5	0,6
1,3	1,1	1,3	0,6	0,5	0,5
1,2	1,0	1,4	0,5	0,4	0,5
1,3	1,1	1,3	0,6	0,5	0,6
1,3	1,1	1,3	0,6	0,5	0,6
1,2	1,0	1,2	0,6	0,5	0,5
1,3	1,1	1,1	0,4	0,4	0,5
1,3	1,1	1,1	0,5	0,4	0,4

Fuente: Autores

Posteriormente, aplicándose la ecuación matricial (Ecuación 28) se calculan los coeficientes (a, b y c) de los polinomios para cada uno de los sensores calibrados (S₁, S₂, S₃, S₄, S₅ y S₆). Considerando el esfuerzo algebraico de resolver la ecuación matricial, haciendo uso de Excel, es posible graficar cada uno de los 18 polinomios (3 grados del polinomio para cada uno de los 6 sensores) y, a partir de esos gráficos, obtener los valores de los coeficientes de esos polinomios. La Figura 14, a seguir, ilustra la representación gráfica de los polinomios, cada uno con su ecuación de ajuste, obtenida por el método de los mínimos cuadrados ordinarios.

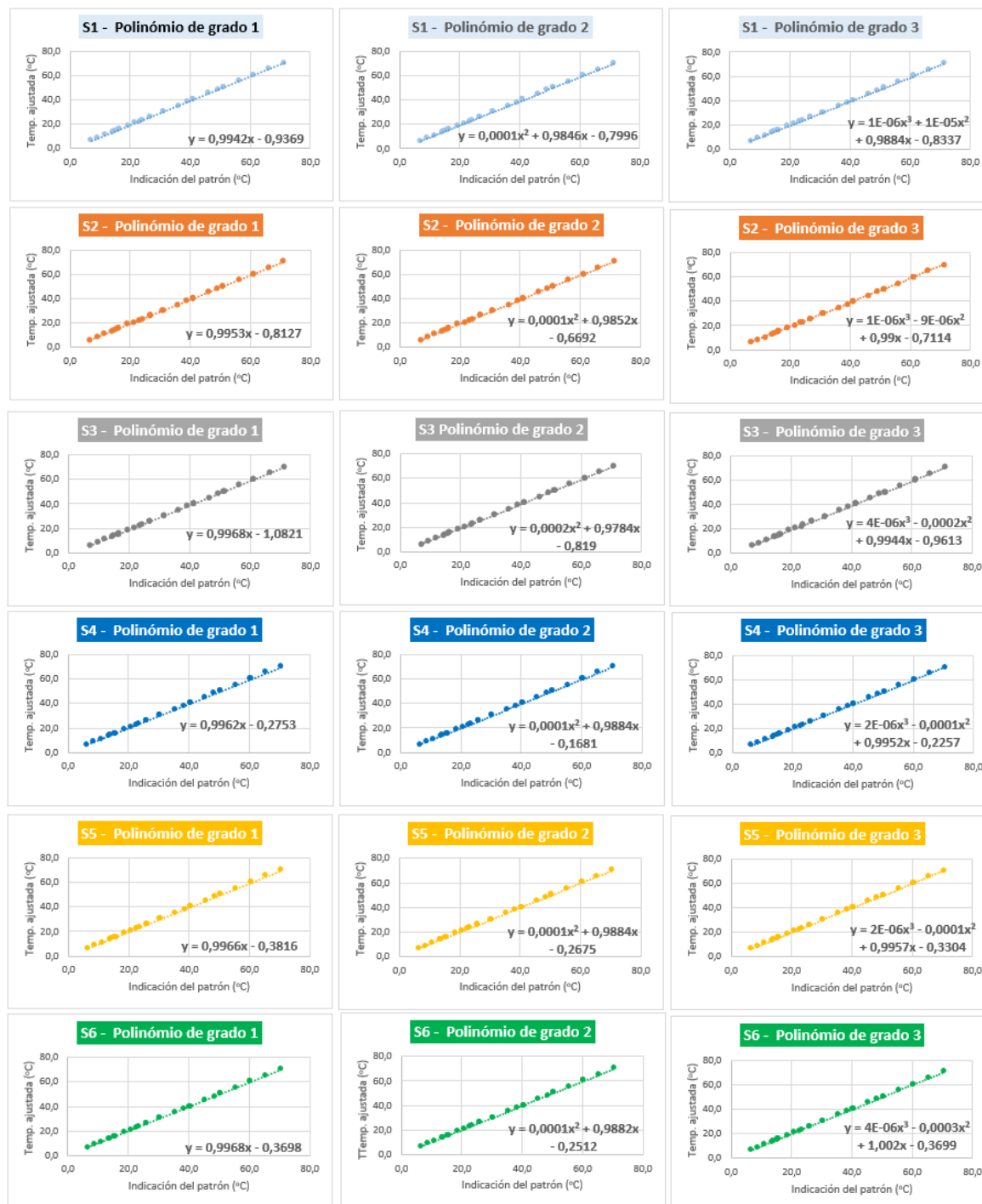


Figura 14 – Representación gráfica de los polinomios considerados

Fuente: Autores

Posteriormente, fue creada una tabla que resume los valores de los coeficientes de los polinomios adoptados. De esta forma, se consigue montar las ecuaciones que corrigen las

lecturas de los sensores de temperatura para obtener el resultado de la calibración individual de cada sensor. La Tabla 4 muestra ilustra lo anterior.

Tabla 4 – Cálculo de los coeficientes de los polinomios interpoladores

Grau	Coef.	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆
		S1	S2	S3	S4	S5	S6
1	a	0,9942	0,9953	0,9968	0,9966	0,9962	0,9968
	b	-0,9369	-0,8127	-1,0821	-0,3816	-0,2753	-0,3698
2	a	0,0001	0,0001	0,0002	0,0001	0,0001	0,0001
	b	0,9846	0,9852	0,9784	0,9884	0,9884	0,9882
	c	-0,7996	-0,6692	-0,819	-0,2675	-0,1681	-0,2512
3	a	1E-06	0,000001	0,000004	0,000002	0,000002	0,000004
	b	0,00001	-0,000009	-0,0002	-0,0001	-0,0001	-0,0003
	c	0,9884	0,99	0,9944	0,9957	0,9952	1,002
	d	-0,8337	-0,07114	-0,9613	-0,3304	-0,2257	-0,3699

Fuente: Autores

Conocidos esos coeficientes, se calcula la temperatura ajustada por cada polinomio que fue considerado. La Tabla 5 presenta esta sección.

Tabla 5 – Temperatura ajusta por el polinomio

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
°C	°C	°C	°C	°C	°C		°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C
6,1	6,2	6,1	6,2	6,2	6,2		6,2	6,2	6,2	6,3	6,3	6,3	6,2	6,9	6,2	6,2	6,2	6,2
8,4	8,4	8,4	8,4	8,4	8,4		8,5	8,5	8,5	8,4	8,4	8,5	8,5	9,1	8,5	8,4	8,4	8,4
10,8	10,7	10,7	10,8	10,8	10,8		10,8	10,8	10,8	10,8	10,8	10,8	10,8	11,4	10,8	10,8	10,8	10,8
13,3	13,2	13,3	13,3	13,3	13,3		13,3	13,2	13,3	13,3	13,3	13,3	13,3	13,9	13,3	13,3	13,3	13,3
13,7	13,7	13,7	13,7	13,7	13,7		13,7	13,7	13,7	13,7	13,7	13,7	13,7	14,4	13,7	13,7	13,7	13,7
15,0	14,9	15,0	15,0	15,0	15,0		15,0	14,9	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,6	15,0	15,0	15,0	15,0
15,4	15,4	15,4	15,4	15,4	15,3		15,4	15,4	15,4	15,4	15,4	15,3	15,4	16,1	15,4	15,4	15,4	15,3
15,5	15,4	15,5	15,5	15,5	15,5		15,5	15,4	15,5	15,5	15,5	15,5	15,5	16,1	15,5	15,5	15,5	15,5
18,4	18,4	18,4	18,4	18,4	18,4		18,3	18,4	18,3	18,3	18,3	18,4	18,4	19,0	18,4	18,4	18,4	18,4
20,5	20,6	20,5	20,5	20,5	20,6		20,5	20,6	20,5	20,5	20,5	20,5	20,5	21,2	20,6	20,6	20,5	20,6
22,3	22,4	22,3	22,3	22,3	22,4		22,3	22,3	22,3	22,3	22,3	22,3	22,3	23,0	22,3	22,3	22,3	22,4
23,1	23,1	23,1	23,1	23,1	23,1		23,1	23,0	23,1	23,1	23,1	23,0	23,1	23,7	23,1	23,1	23,1	23,1
25,7	25,7	25,6	25,6	25,6	25,6		25,7	25,6	25,5	25,6	25,6	25,6	25,7	26,3	25,6	25,6	25,6	25,6
25,7	25,7	25,7	25,7	25,7	25,6		25,7	25,6	25,6	25,7	25,7	25,6	25,7	26,3	25,7	25,7	25,7	25,6
30,2	30,1	30,1	30,1	30,1	30,1		30,1	30,1	30,0	30,1	30,1	30,1	30,1	30,7	30,1	30,1	30,1	30,1
30,0	30,0	30,1	30,0	30,0	30,0		29,9	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	29,9	30,6	30,1	30,0	30,0	30,0
35,2	35,1	35,1	35,1	35,1	35,1		35,1	35,0	35,0	35,0	35,0	35,1	35,1	35,7	35,1	35,1	35,1	35,1
38,0	38,1	38,1	38,1	38,1	38,1		38,0	38,0	37,9	38,0	38,0	38,0	38,0	38,7	38,1	38,1	38,1	38,1
40,0	40,1	40,1	40,1	40,1	40,1		39,9	40,0	39,9	40,0	40,0	40,0	40,0	40,7	40,0	40,1	40,0	40,1
40,0	40,1	40,2	40,1	40,1	40,1		39,9	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	40,7	40,1	40,1	40,0	40,1
40,0	40,0	40,1	40,0	40,1	40,0		39,9	39,9	39,9	39,9	40,0	39,9	40,0	40,6	40,0	40,0	40,0	40,0
45,1	45,1	45,0	45,1	45,1	45,1		45,0	45,0	44,8	45,0	45,0	45,0	45,0	45,6	44,9	45,1	45,0	45,1
48,1	48,1	48,1	48,1	48,0	48,1		48,0	47,9	47,9	48,0	48,0	48,0	48,0	48,6	48,1	48,1	48,0	48,1
50,1	50,0	50,1	50,0	50,0	50,0		50,0	49,9	49,9	50,0	50,0	49,9	50,0	50,6	50,1	50,1	50,0	50,0
50,1	50,0	50,3	50,0	50,0	50,1		50,0	49,9	50,1	50,0	50,0	50,0	50,0	50,6	50,3	50,1	50,0	50,1
55,0	55,0	55,0	55,0	55,0	55,1		55,0	54,9	54,9	55,0	55,0	55,0	55,0	55,6	55,1	55,1	55,0	55,1
60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0		59,9	59,9	59,9	60,0	60,0	60,0	60,0	60,6	60,2	60,1	60,1	60,1
60,0	60,0	60,0	60,1	60,1	60,0		59,9	59,9	59,9	60,1	60,1	60,0	60,0	60,6	60,2	60,2	60,2	60,1
65,1	65,1	65,0	65,0	65,1	65,1		65,0	65,0	64,9	65,0	65,1	65,1	65,1	65,7	65,3	65,1	65,2	65,3
70,0	70,1	69,9	70,1	70,1	70,0		70,0	70,0	69,9	70,1	70,1	70,0	70,2	70,7	70,3	70,3	70,2	70,3

Fuente: Autores

Conocido el valor de la temperatura ajustada por cada uno de los polinomios considerados, se calcula la incertidumbre del ajuste por el método de los mínimos cuadrados, conforme

definido por la Ecuación (29). La Tabla 6, a seguir, documento el componente del error cuadrático de la Ecuación (29), i.e.: $[y(x_i) - y_i]^2$.

Tabla 6 – Cálculo del término que computa el 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
0,0061	0,0021	0,0111	0,0000	0,0000	0,0001	0,0000	0,0010	0,0013	0,0036	0,0037	0,0057	0,0002	0,4340	0,0001	0,0014	0,0016	0,0010
0,0084	0,0032	0,0127	0,0124	0,0117	0,0096	0,0013	0,0000	0,0000	0,0038	0,0038	0,0022	0,0017	0,4044	0,0008	0,0056	0,0054	0,0053
0,0000	0,0045	0,0144	0,0004	0,0003	0,0000	0,0011	0,0008	0,0021	0,0002	0,0002	0,0009	0,0011	0,3760	0,0024	0,0001	0,0001	0,0004
0,0064	0,0004	0,0052	0,0052	0,0053	0,0075	0,0101	0,0018	0,0124	0,0085	0,0086	0,0112	0,0111	0,4745	0,0165	0,0094	0,0091	0,0124
0,0149	0,0066	0,0168	0,0168	0,0165	0,0132	0,0109	0,0041	0,0090	0,0124	0,0123	0,0095	0,0098	0,3411	0,0056	0,0111	0,0115	0,0081
0,0049	0,0002	0,0044	0,0044	0,0044	0,0065	0,0063	0,0005	0,0072	0,0060	0,0061	0,0082	0,0076	0,4523	0,0129	0,0076	0,0072	0,0109
0,0003	0,0037	0,0002	0,0002	0,0002	0,0049	0,0006	0,0044	0,0008	0,0006	0,0006	0,0038	0,0011	0,5152	0,0036	0,0012	0,0010	0,0022
0,0003	0,0015	0,0002	0,0002	0,0002	0,0009	0,0006	0,0011	0,0008	0,0005	0,0006	0,0013	0,0010	0,3817	0,0035	0,0012	0,0010	0,0027
0,0223	0,0107	0,0209	0,0212	0,0214	0,0169	0,0258	0,0138	0,0269	0,0226	0,0225	0,0190	0,0218	0,2913	0,0137	0,0178	0,0189	0,0125
0,0001	0,0013	0,0000	0,0000	0,0000	0,0002	0,0013	0,0001	0,0019	0,0003	0,0003	0,0000	0,0004	0,4484	0,0002	0,0000	0,0000	0,0007
0,0060	0,0163	0,0086	0,0083	0,0078	0,0115	0,0020	0,0081	0,0011	0,0049	0,0049	0,0067	0,0040	0,5679	0,0097	0,0087	0,0076	0,0137
0,0007	0,0057	0,0001	0,0001	0,0002	0,0090	0,0041	0,0136	0,0057	0,0013	0,0013	0,0152	0,0020	0,2998	0,0001	0,0001	0,0003	0,0075
0,0033	0,0002	0,0003	0,0004	0,0006	0,0000	0,0001	0,0018	0,0109	0,0027	0,0027	0,0017	0,0010	0,3910	0,0008	0,0006	0,0011	0,0000
0,0001	0,0014	0,0010	0,0009	0,0007	0,0028	0,0016	0,0085	0,0031	0,0000	0,0000	0,0083	0,0003	0,3310	0,0004	0,0006	0,0003	0,0026
0,0067	0,0017	0,0003	0,0002	0,0001	0,0010	0,0003	0,0011	0,0098	0,0008	0,0008	0,0003	0,0019	0,4086	0,0001	0,0000	0,0001	0,0006
0,0138	0,0034	0,0003	0,0073	0,0082	0,0045	0,0331	0,0174	0,0098	0,0165	0,0165	0,0139	0,0239	0,2916	0,0001	0,0096	0,0116	0,0055
0,0233	0,0138	0,0104	0,0095	0,0081	0,0135	0,0054	0,0007	0,0016	0,0021	0,0021	0,0031	0,0113	0,4945	0,0040	0,0064	0,0045	0,0103
0,0013	0,0107	0,0085	0,0076	0,0061	0,0114	0,0025	0,0000	0,0035	0,0011	0,0011	0,0018	0,0002	0,4677	0,0028	0,0049	0,0031	0,0082
0,0006	0,0089	0,0074	0,0065	0,0050	0,0101	0,0041	0,0001	0,0049	0,0007	0,0007	0,0007	0,0006	0,4517	0,0023	0,0041	0,0024	0,0071
0,0006	0,0089	0,0344	0,0065	0,0050	0,0101	0,0041	0,0001	0,0009	0,0007	0,0007	0,0012	0,0006	0,4517	0,0219	0,0041	0,0024	0,0071
0,0006	0,0000	0,0074	0,0004	0,0050	0,0000	0,0041	0,0116	0,0049	0,0054	0,0007	0,0042	0,0006	0,3279	0,0023	0,0013	0,0024	0,0002
0,0089	0,0050	0,0009	0,0040	0,0027	0,0071	0,0000	0,0015	0,0361	0,0001	0,0001	0,0003	0,0025	0,4182	0,0028	0,0030	0,0014	0,0059
0,0060	0,0032	0,0036	0,0028	0,0016	0,0056	0,0002	0,0030	0,0096	0,0000	0,0000	0,0001	0,0015	0,4026	0,0031	0,0029	0,0012	0,0061
0,0043	0,0022	0,0029	0,0021	0,0011	0,0010	0,0007	0,0041	0,0101	0,0000	0,0000	0,0085	0,0011	0,3941	0,0042	0,0030	0,0012	0,0004
0,0012	0,0028	0,0234	0,0029	0,0045	0,0010	0,0160	0,0270	0,0000	0,0097	0,0098	0,0085	0,0046	0,2786	0,0276	0,0020	0,0043	0,0003
0,0002	0,0007	0,0002	0,0004	0,0013	0,0000	0,0099	0,0182	0,0228	0,0028	0,0029	0,0023	0,0007	0,3205	0,0028	0,0002	0,0001	0,0026
0,0001	0,0000	0,0005	0,0002	0,0000	0,0013	0,0046	0,0100	0,0084	0,0000	0,0000	0,0000	0,0005	0,3750	0,0273	0,0075	0,0037	0,0195
0,0085	0,0100	0,0061	0,0001	0,0000	0,0041	0,0282	0,0401	0,0367	0,0000	0,0000	0,0098	0,0059	0,2625	0,0043	0,0076	0,0038	0,0016
0,0052	0,0055	0,0208	0,0239	0,0056	0,0009	0,0172	0,0258	0,0493	0,0219	0,0024	0,0020	0,0003	0,3221	0,0108	0,0008	0,0019	0,0228
0,0102	0,0095	0,0676	0,0052	0,0088	0,0212	0,0194	0,0276	0,0859	0,0014	0,0015	0,0185	0,0000	0,3389	0,0144	0,0150	0,0082	0,0178

Fuente: Autores

Conocido el error cuadrático para cada punto experimental, se completa el cálculo de la incertidumbre de ajuste dada por la Ecuación (29). La Tabla 7 ilustra los resultados para el cálculo de la incertidumbre de ajuste.

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 3	Grado 1	Grado 3	Grado 2	Grado 2	Grado 2
0,1041	0,1144	0,1352	0,1091	0,0985	0,1242

Fuente: Autores

De esta forma, para los datos utilizados [29-30] se observa que el polinomio que mejor representa los datos experimentales varía desde un polinomio lineal hasta un polinomio de tercer grado. Esto depende de la naturaleza física del problema que se esté analizando. A partir de los grados de libertad asociada a cada uno de los polinomios identificados , y que mejor modela la naturaleza física de la calibración de cada sensor, y para un nivel de

confianza de 95% ($1-\alpha = 0,95$), se determina el factor de cobertura k , a partir de la distribución *t-student*, cuyo resultado para cada sensor calibrado es dado en la Tabla 8.

Tabla 8 – Factor de cobertura k

Factor de Cobertura (k)					
T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6
S1	S2	S3	S4	S5	S6
2,06	2,05	2,05	2,05	2,05	2,05

Fuente: Autores

Es importante no confundir aquí el uso de polinomios de grados 1, 2 y 3 (ver Tabla 4), utilizados para implementar el ajuste de los datos brutos leídos por los diferentes sensores, con el hecho conocido de que un sensor de temperatura presenta una respuesta esencialmente lineal entre la temperatura y el valor del elemento resistivo del sensor. La elección de los polinomios de grado n para minimizar la incertidumbre del ajuste solo tiene como objetivo reducir la incertidumbre de la correlación entre el valor no ajustado indicado por el sensor y el valor ajustado por la introducción de la calibración personalizada de cada sensor.

Conocido el **Factor de Cobertura k** , se calculan los componentes de la **Incertidumbre Expandida U_E** . Específicamente, con el valor de k , (i) se calcula el componente de la **Incertidumbre asociada a la resolución del instrumento U_{Inst}** ; (ii) se calcula el componente de la **Incertidumbre de ajuste U_s** , (iii) se considera la **Incertidumbre del Patrón U_p** , obtenida de su Certificado de Calibración y (iv) el **componente de la Incertidumbre debido a la repetibilidad**; *i.e.*: repeticiones de lecturas distintas de un mismo punto de calibración (inexistente caso que únicamente se tenga una lectura registrada). La Tabla 9 documenta los valores de esos componentes de incertidumbre para cada sensor.

Tabla 9 – 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		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	
0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,1	0,1041	0,1144	0,1352	0,1091	0,0985	0,1242	0,24	0,26	0,30	0,25	0,23	0,27
0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,1	0,1041	0,1144	0,1352	0,1091	0,0985	0,1242	0,24	0,26	0,30	0,25	0,23	0,27
0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,1	0,1041	0,1144	0,1352	0,1091	0,0985	0,1242	0,24	0,26	0,30	0,25	0,23	0,27
0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,1	0,1041	0,1144	0,1352	0,1091	0,0985	0,1242	0,24	0,26	0,30	0,25	0,23	0,27
0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,1	0,1041	0,1144	0,1352	0,1091	0,0985	0,1242	0,24	0,26	0,30	0,25	0,23	0,27
0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,1	0,1041	0,1144	0,1352	0,1091	0,0985	0,1242	0,24	0,26	0,30	0,25	0,23	0,27
0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,1	0,1041	0,1144	0,1352	0,1091	0,0985	0,1242	0,24	0,26	0,30	0,25	0,23	0,27
0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,1	0,1041	0,1144	0,1352	0,1091	0,0985	0,1242	0,24	0,26	0,30	0,25	0,23	0,27
0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,1	0,1041	0,1144	0,1352	0,1091	0,0985	0,1242	0,24	0,26	0,30	0,25	0,23	0,27
0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,1	0,1041	0,1144	0,1352	0,1091	0,0985	0,1242	0,24	0,26	0,30	0,25	0,23	0,27
0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,1	0,1041	0,1144	0,1352	0,1091	0,0985	0,1242	0,24	0,26	0,30	0,25	0,23	0,27
0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,1	0,1041	0,1144	0,1352	0,1091	0,0985	0,1242	0,24	0,26	0,30	0,25	0,23	0,27
0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,1	0,1041	0,1144	0,1352	0,1091	0,0985	0,1242	0,24	0,26	0,30	0,25	0,23	0,27
0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,1	0,1041	0,1144	0,1352	0,1091	0,0985	0,1242	0,24	0,26	0,30	0,25	0,23	0,27
0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,1	0,1041	0,1144	0,1352	0,1091	0,0985	0,1242	0,24	0,26	0,30	0,25	0,23	0,27
0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,1	0,1041	0,1144	0,1352	0,1091	0,0985	0,1242	0,24	0,26	0,30	0,25	0,23	0,27
0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,1	0,1041	0,1144	0,1352	0,1091	0,0985	0,1242	0,24	0,26	0,30	0,25	0,23	0,27
0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,1	0,1041	0,1144	0,1352	0,1091	0,0985	0,1242	0,24	0,26	0,30	0,25	0,23	0,27
0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,1	0,1041	0,1144	0,1352	0,1091	0,0985	0,1242	0,24	0,26	0,30	0,25	0,23	0,27
0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,1	0,1041	0,1144	0,1352	0,1091	0,0985	0,1242	0,24	0,26	0,30	0,25	0,23	0,27
0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,1	0,1041	0,1144	0,1352	0,1091	0,0985	0,1242	0,24	0,26	0,30	0,25	0,23	0,27
0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,1	0,1041	0,1144	0,1352	0,1091	0,0985	0,1242	0,24	0,26	0,30	0,25	0,23	0,27
0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,1	0,1041	0,1144	0,1352	0,1091	0,0985	0,1242	0,24	0,26	0,30	0,25	0,23	0,27
0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,1	0,1041	0,1144	0,1352	0,1091	0,0985	0,1242	0,24	0,26	0,30	0,25	0,23	0,27

Fuente: Autores

Para el polinomio que mejor modela la naturaleza física de la calibración, y para los niveles de incertidumbre expandida definidos anteriormente, el polinomio seleccionado para cada sensor se usa para (i) corregir el valor original indicado por él y (ii) para determinar El error sistemático ajustado. La Tabla 10, a continuación, presenta finalmente los resultados de interés práctico que se utilizarán para calcular los parámetros asociados a sistema térmico del motor de combustión interna del laboratorio de experimento de la UAN-Sede Puerto Colombia.

Tabla 10 – Cálculo de la temperatura ajustada y el error sistemático asociado

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
6,2	6,2	6,2	6,3	6,3	6,3	6,2	0,00	-0,05	-0,01	0,06	0,06	0,08
8,5	8,4	8,5	8,4	8,4	8,5	8,5	-0,04	-0,06	-0,03	-0,06	-0,06	-0,05
10,8	10,7	10,8	10,8	10,8	10,8	10,8	0,03	-0,07	-0,05	0,02	0,02	0,03
13,3	13,2	13,3	13,3	13,3	13,3	13,2	0,10	0,02	0,13	0,09	0,09	0,11
13,7	13,7	13,7	13,7	13,7	13,7	13,8	-0,10	-0,08	-0,08	-0,11	-0,11	-0,10
15,0	14,9	15,0	15,0	15,0	15,0	14,9	0,08	0,01	0,11	0,08	0,08	0,09
15,4	15,4	15,4	15,4	15,4	15,3	15,4	0,02	0,06	0,06	0,02	0,02	-0,06
15,5	15,4	15,5	15,5	15,5	15,5	15,5	0,02	-0,04	0,06	0,02	0,02	0,04
18,3	18,4	18,4	18,3	18,3	18,4	18,5	-0,16	-0,10	-0,12	-0,15	-0,15	-0,14
20,5	20,6	20,6	20,5	20,5	20,5	20,6	-0,04	0,04	0,01	-0,02	-0,02	0,00
22,3	22,4	22,3	22,3	22,3	22,3	22,3	0,04	0,13	0,10	0,07	0,07	0,08
23,1	23,1	23,1	23,1	23,1	23,0	23,2	-0,06	-0,08	-0,01	-0,04	-0,04	-0,12
25,7	25,7	25,6	25,6	25,6	25,6	25,7	0,01	0,01	-0,03	-0,05	-0,05	-0,04
25,7	25,7	25,7	25,7	25,7	25,6	25,7	-0,04	-0,04	0,02	0,00	0,00	-0,09
30,1	30,1	30,1	30,1	30,1	30,1	30,1	0,02	0,04	-0,01	-0,03	-0,03	-0,02
29,9	30,0	30,1	30,0	30,0	30,0	30,1	-0,18	-0,06	-0,01	-0,13	-0,13	-0,12
35,1	35,1	35,1	35,0	35,0	35,1	35,0	0,07	0,12	0,06	0,05	0,05	0,06
38,0	38,1	38,1	38,0	38,0	38,0	38,0	-0,05	0,10	0,05	0,03	0,03	0,04
39,9	40,1	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	-0,06	0,09	0,05	0,03	0,03	0,03
39,9	40,1	40,1	40,0	40,0	40,0	40,0	-0,06	0,09	0,15	0,03	0,03	0,03
39,9	40,0	40,0	39,9	40,0	39,9	40,0	-0,06	-0,01	0,05	-0,07	0,03	-0,07
45,0	45,1	44,9	45,0	45,0	45,0	45,0	0,00	0,07	-0,05	0,01	0,01	0,02
48,0	48,1	48,1	48,0	48,0	48,0	48,0	-0,02	0,06	0,06	0,00	0,00	0,01
50,0	50,0	50,1	50,0	50,0	49,9	50,0	-0,03	0,05	0,07	0,00	0,00	-0,09
50,0	50,0	50,3	50,0	50,0	50,0	50,1	-0,13	-0,05	0,17	-0,10	-0,10	-0,09
55,0	55,0	55,1	55,0	55,0	55,0	55,1	-0,10	-0,03	0,05	-0,05	-0,05	-0,05
59,9	60,0	60,2	60,0	60,0	60,0	60,0	-0,07	0,00	0,17	0,00	0,00	0,00
59,9	60,0	60,2	60,1	60,1	60,0	60,1	-0,17	-0,10	0,07	0,00	0,00	-0,10
65,0	65,1	65,3	65,0	65,1	65,1	65,2	-0,13	-0,07	0,10	-0,15	-0,05	-0,04
70,0	70,1	70,3	70,1	70,1	70,0	70,2	-0,14	-0,10	0,12	-0,04	-0,04	-0,14

Fuente: Autores

El análisis de los resultados reportados en la Tabla 10, arriba, muestra, explícitamente, los beneficios del proceso de calibración. Se observa que los errores originales (no ajustados) informados en la Tabla 3 se han reducido drásticamente. Tomando el sensor S1 como ejemplo, los errores no ajustados que van desde 0.9 °C a 1.3 °C (ver Tabla 3) se han reducido a un nivel que no excede ± 0.18 °C (ver Tabla 10), resultado del ajuste que se aplica a los 6 sensores.

La Figura 15 ilustra, gráficamente, la contribución relevante de la calibración incorporada a los resultados de medición a través de los respectivos polinomios de ajuste. De manera integrada, esta figura muestra lo que se llama **Error total**, definido por la suma de dos gráficos: **Error sistemático + Incertidumbre expandida**.

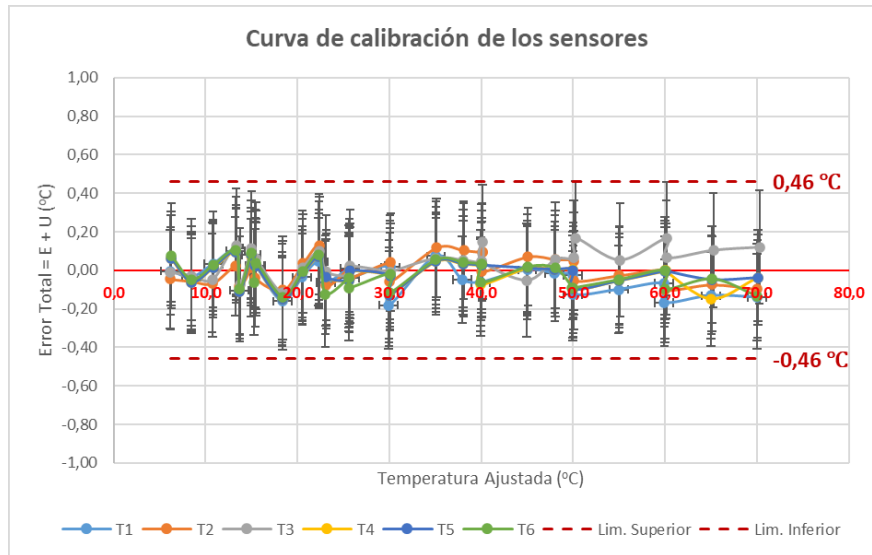


Figura 15 – Error total asociado a la calibración de los sensores de temperatura
Fuente: Autores

5.3 Herramienta para evaluar la confiabilidad del sistema de gravimétrico

Con el auxilio de Microsoft Excel fue posible desarrollar una herramienta de cálculo para evaluar la confiabilidad metrológica de un sistema gravimétrico asociado al motor de combustión interna, el cual debe ser utilizado para la medición del consumo de combustible específico. Con esta herramienta será posible, de forma experimental, analizar los datos de la calibración de una balanza digital que será fundamental para la realización de los experimentos en el laboratorio. De esta forma, se facilita el análisis de los resultados y, adicionalmente, obtener resultados confiables de los parámetros de masa asociados al motor de combustión interna. Vale la pena resaltar que, con el propósito de priorizar la validación de la planilla desarrollada, fueron utilizados datos experimentales disponibles en la literatura especializada [31]. En ese orden de ideas, a seguir se presentará el paso a paso del uso de las planillas y los datos experimentales mostrados, disponibles en la referencia [31], así como los resultados de los mismos. Con esto, se muestra la robustez de la herramienta de cálculo para el análisis de la calibración de un sistema gravimétrico para la medición del consumo de combustible.

En primer lugar, se cuenta con una sección para incluir hasta 42 puntos experimentales de calibración, así como una columna para registrar la temperatura ambiente y la presión

atmosférica. Esto permitirá, determinar el factor de empuje a partir del principio de Arquímedes y que impacta directamente en la medición de masa. En este punto es importante destacar que la planilla elaborada sigue las directrices de Guía sugerida por el Sistema Interamericano de Metrología (SIM, 2009) [32]. La Tabla 11 documenta la sección de registro de datos tanto para la carga ascendente como para la carga descendente.

Tabla 11 – Cálculo de la temperatura ajustada y el error sistemático asociado

CARGA ASCENDENTE CON REGRESO A CERO					CARGA DESCENDENTE CON REGRESO A CERO				
Puntos	Masa patrón kg	Indicación de la balanza kg	Temperatura ambiente °C	Presión atmosférica mbar/abs	Puntos	Masa patrón kg	Indicación de la balanza kg	Temperatura ambiente °C	Presión atmosférica mbar/abs
1	0	0,001	27,7	1021,7	1	0	0,001	27,5	1021,7
2	3	2,997	27,7	1021,7	2	3	2,998	27,5	1021,7
3	0	0,001	27,7	1021,7	3	0	0,001	27,5	1021,7
4	6	5,993	27,7	1021,7	4	6	5,994	27,5	1021,7
5	0	0,001	27,7	1021,7	5	0	0,001	27,5	1021,7
6	9	8,998	27,7	1021,7	6	9	8,998	27,5	1021,7
7	0	0,001	27,7	1021,7	7	0	0,002	27,5	1021,7
8	12	11,977	27,7	1021,7	8	12	11,979	27,5	1021,7
9	0	0,001	27,7	1021,7	9	0	0,002	27,5	1021,7
10	15	14,964	27,7	1021,7	10	15	14,964	27,5	1021,7
11	0	0,001	27,7	1021,7	11	0	0,002	27,5	1021,7
12	18	17,996	27,7	1021,7	12	18	17,995	27,5	1021,7
13	0	0,001	27,7	1021,7	13	0	0,001	27,5	1021,7
14	21	20,992	27,7	1021,7	14	21	20,994	27,5	1021,7
15	0	0,001	27,7	1021,7	15	0	0,001	27,5	1021,7
16	24	23,994	27,7	1021,7	16	24	23,994	27,5	1021,7
17	0	0,001	27,7	1021,7	17	0	0,001	27,5	1021,7
18	27	26,989	27,6	1021,7	18	27	26,988	27,5	1021,7
19	0	0,001	27,6	1021,7	19	0	0,001	27,5	1021,7
20	30	29,987	27,5	1021,7	20	30	29,987	27,4	1021,7
21	0	0,001	27,5	1021,7	21	0	0,001	27,4	1021,7

Fuente: Autores

En función del valor de la masa patrón a ser utilizada, se debe identificar de forma clara todas las posibles combinaciones que serán realizadas en el proceso experimental. De esta manera, la herramienta de cálculo diseñada establece por defecto las combinaciones posibles según las recomendaciones de la Organización Mundial de Metrología Legal en su recomendación R-76-1 [33]. La Tabla 12 documenta esta situación.

Tabla 12 – Configuración de las masas patrón

No	Valor patrón	Identificación Patrón
1	1	1 kg (F1)
2	2	2 kg (F1)
3	3	1 kg (F1); 2 kg (F1)
4	4	2 kg (F1); 2 kg (F1)
5	5	5 kg (F1)
6	6	1 kg (F1); 5 kg (F1)
7	7	2 kg (F1); 5 kg (F1)
8	8	1 kg (F1); 2 kg (F1); 5 kg (F1)
9	9	2 kg (F1); 2 kg (F1); 5 kg (F1)
10	20	1 kg (F1); 2 kg (F1); 2 kg (F1); 5 kg (F1)
11	20	Masa patrón 20 kg (M1)
12	21	1 kg (F1); Masa patrón 20 kg (M1)
13	22	2 kg (F1); Masa patrón 20 kg (M1)
14	23	1 kg (F1); 2 kg (F1); Masa patrón 20 kg (M1)
15	24	2 kg (F1); 2 kg (F1); Masa patrón 20 kg (M1)
16	25	5 kg (F1); Masa patrón 20 kg (M1)
17	30	1 kg (F1); 2 kg (F1); 2 kg (F1); 5 kg (F1); Masa patrón 20 kg (M1)

No	Valor patrón	Identificación Patrón
1	100	100 g (F1)
2	200	200 g (F1)
3	300	100 g (F1); 200 g (F1)
4	400	200 g (F1); 200 g (F1)
5	500	500 g (F1)
6	600	100 g (F1); 500 g (F1)
7	700	200 g (F1); 500 g (F1)
8	800	100 g (F1); 200 g (F1); 500 g (F1)
9	900	200 g (F1); 200 g (F1); 500 g (F1)
10	1000	1000 g (F1)
11	1100	100 g (F1); 1000 g (F1)
12	1200	200 g (F1); 1000 g (F1)
13	1300	100 g (F1); 200 g (F1); 1000 g (F1)
14	1400	200 g (F1); 200 g (F1); 1000 g (F1)
15	1500	100 g (F1); 200 g (F1); 200 g (F1); 1000 g (F1)

Fuente: Autores

En este punto los valores asociados a la incertidumbre de medición de las masas patrones deben ser considerados. La Tabla 13 muestra que existe un espacio especial para documentar estos valores que deben estar en los certificados de calibración de las masas patrones a ser utilizadas.

Tabla 13 – Ingreso de los valores de incertidumbre de las masas patrón

No	Valor nominal	Identificación patrón	Error g	Incertidumbre Expandida (U)	Factor k	Incertidumbre (u)
1	100	100 g (F1)	0,000145	0,00017	2,0	0,000085
2	200	200 g (F1)	0,000212	0,00033	2,0	0,00017
3	200	200 g (F1)	-0,000221	0,00033	2,0	0,00017
4	500	500 g (F1)	0,000990	0,00083	2,0	0,00042
5	1000	1000 g (F1)	0,000590	0,0017	2,0	0,00085

No	Valor nominal	Identificación patrón	Error kg	Incertidumbre Expandida (U)	Factor k	Incertidumbre (u)
6	1,0	1 kg (F1)	0,0000059	0,000017	2,0	0,0000085
7	2,0	2 kg (F1)	0,0000306	0,000033	2,0	0,000017
8	2,0	2 kg (F1)	0,0000306	0,000033	2,0	0,000017
9	5,0	5 kg (F1)	0,0000330	0,000083	2,0	0,000042
10	10,0	10 kg (F1)	0,0002200	0,000170	2,0	0,000085
11	20,0	Masa patrón 20 kg (M1)	0,000064	0,000033	2,0	0,000017

Fuente: Autores

Enseguida se realizan los cálculos asociados a la calibración de la balanza. Estos parámetros corresponden a la masa indicada, la masa aparente, así como sus respectivas incertidumbres. Adicionalmente, se determina la incertidumbre de la presión atmosférica y la masa específica del aire, es decir, la densidad del aire. Las Tablas 14 y 15 muestran los resultados que pueden obtenerse, utilizando la herramienta de cálculo, tanto para la carga ascendente, como para la carga descendente.

Tabla 14 – Resultados asociados a la calibración (balanza carga ascendente)

Puntos	Carga Ascendente											
	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 ³	kg/m ³
1	0	0,00000	0,001	0,001	0,000000	0,000	27,7	0,25	1021,7	0,058	1,183	0,0010
2	3	0,0000186	2,997	3,013	0,0000019	-0,016	27,7	0,25	1021,7	0,058	1,183	0,0010
3	0	0,0000000	0,001	0,001	0,0000000	0,000	27,7	0,25	1021,7	0,058	1,183	0,0010
4	6	0,0000042	5,993	6,024	0,0000043	-0,031	27,7	0,25	1021,7	0,058	1,183	0,0010
5	0	0,0000000	0,001	0,001	0,0000000	0,000	27,7	0,25	1021,7	0,058	1,183	0,0010
6	9	0,0000048	8,998	9,045	0,0000049	-0,047	27,7	0,25	1021,7	0,058	1,183	0,0010
7	0	0,0000000	0,001	0,001	0,0000000	0,000	27,7	0,25	1021,7	0,058	1,183	0,0010
8	12	0,0000087	11,977	12,039	0,0000088	-0,062	27,7	0,25	1021,7	0,058	1,183	0,0010
9	0	0,0000000	0,001	0,001	0,0000000	0,000	27,7	0,25	1021,7	0,058	1,183	0,0010
10	15	0,0000095	14,964	15,042	0,0000097	-0,078	27,7	0,25	1021,7	0,058	1,183	0,0010
11	0	0,0000000	0,001	0,001	0,0000000	0,000	27,7	0,25	1021,7	0,058	1,183	0,0010
12	18	0,0000096	17,996	18,090	0,0000099	-0,094	27,7	0,25	1021,7	0,058	1,183	0,0010
13	0	0,0000000	0,001	0,001	0,0000000	0,000	27,7	0,25	1021,7	0,058	1,183	0,0010
14	21	0,00001652	20,992	21,101	0,0000168	-0,109	27,7	0,25	1021,7	0,058	1,183	0,0010
15	0	0,0000000	0,001	0,001	0,0000000	0,000	27,7	0,25	1021,7	0,058	1,183	0,0010
16	24	0,00001666	23,994	24,119	0,0000170	-0,125	27,7	0,25	1021,7	0,058	1,183	0,0010
17	0	0,0000000	0,001	0,001	0,0000000	0,000	27,7	0,25	1021,7	0,058	1,183	0,0010
18	27	0,00001709	26,989	27,130	0,000017	-0,141	27,6	0,25	1021,7	0,058	1,184	0,0010
19	0	0,0000000	0,001	0,001	0,0000000	0,000	27,6	0,25	1021,7	0,058	1,184	0,0010
20	30	0,00001856	29,987	30,143	0,000019	-0,156	27,5	0,25	1021,7	0,058	1,184	0,0010
21	0	0,0000000	0,001	0,001	0,0000000	0,000	27,5	0,25	1021,7	0,058	1,184	0,0010

Fuente: Autores

Tabla 15 – Resultados asociados a la 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	Indicado - aparente	Indicada	Incertidumbre	Indicación barómetro	Incertidumbre	Indicado	Incertidumbre
	kg	kg	kg	kg	kg	kg	°C	°C	mbar/abs	mbar/abs	kg/m ³	kg/m ³
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	3	0,0000186	3,000	3,016	0,000019	-0,016	27,5	0,25	1021,7	0,058	1,184	0,0010
3	0	0,0000000	0,000	0,000	0,0000000	0,000	27,5	0,25	1021,7	0,058	1,184	0,0010
4	6	0,0000042	6,000	6,031	0,0000043	-0,031	27,5	0,25	1021,7	0,058	1,184	0,0010
5	0	0,0000000	0,000	0,000	0,0000000	0,000	27,5	0,25	1021,7	0,058	1,184	0,0010
6	9	0,0000048	9,000	9,047	0,0000049	-0,047	27,5	0,25	1021,7	0,058	1,184	0,0010
7	0	0,0000000	0,000	0,000	0,0000000	0,000	27,5	0,25	1021,7	0,058	1,184	0,0010
8	12	0,0000087	12,000	12,063	0,0000088	-0,063	27,5	0,25	1021,7	0,058	1,184	0,0010
9	0	0,0000000	0,000	0,000	0,0000000	0,000	27,5	0,25	1021,7	0,058	1,184	0,0010
10	15	0,0000095	15,000	15,078	0,0000097	-0,078	27,5	0,25	1021,7	0,058	1,184	0,0010
11	0	0,0000000	0,000	0,000	0,0000000	0,000	27,5	0,25	1021,7	0,058	1,184	0,0010
12	18	0,0000096	18,000	18,094	0,0000099	-0,094	27,5	0,25	1021,7	0,058	1,184	0,0010
13	0	0,0000000	0,000	0,000	0,0000000	0,000	27,5	0,25	1021,7	0,058	1,184	0,0010
14	21	0,0000165	21,000	21,110	0,0000168	-0,110	27,5	0,25	1021,7	0,058	1,184	0,0010
15	0	0,0000000	0,000	0,000	0,0000000	0,000	27,5	0,25	1021,7	0,058	1,184	0,0010
16	24	0,0000167	24,000	24,125	0,0000170	-0,125	27,5	0,25	1021,7	0,058	1,184	0,0010
17	0	0,0000000	0,000	0,000	0,0000000	0,000	27,5	0,25	1021,7	0,058	1,184	0,0010
18	27	0,000017	27,000	27,141	0,000017	-0,141	27,5	0,25	1021,7	0,058	1,184	0,0010
19	0	0,0000000	0,000	0,000	0,0000000	0,000	27,5	0,25	1021,7	0,058	1,184	0,0010
20	30	0,000019	30,000	30,156	0,000019	-0,156	27,4	0,25	1021,7	0,058	1,184	0,0010
21	0	0,0000000	0,000	0,000	0,0000000	0,000	27,4	0,25	1021,7	0,058	1,184	0,0010

Fuente: Autores

Para un mejor entendimiento de las tablas presentadas arriba, a continuación, se describe cada uno de los términos utilizados y las ecuaciones aplicadas para la obtención de cada parámetro calculado:

- La columna que indica **Patrón** muestra la masa nominal colocada en la plataforma de la balanza, junto con la incertidumbre de medición asociada a las masas patrón. Estas incertidumbres son informadas en los certificados de calibración. El cálculo de las incertidumbres asociadas, según la combinación de las masas, fue realizada según los lineamientos descritos en la ISO GUM (2008).
- La columna que indica **Balanza** muestra: (i) la masa indicada, que corresponde a la lectura de la balanza según la masa patrón colocada en la plataforma; (ii) la masa aparente, que se calcula aplicándose la Ecuación (31); (iii) la incertidumbre de la masa aparente, que fue calculada a partir de la Ecuación:

$$m_{ap} = \frac{F}{g_{ref}} = m_o \cdot \left(1 - \frac{\rho_{ar}}{\rho_o}\right) \cdot \left(\frac{g}{g_{ref}}\right) \quad (31)$$

La masa aparente (m_{ap}) es definida como el valor que indicaría la balanza considerando los factores debidos a la aceleración de la gravedad y del factor

de empuje. Este valor es calculado dividiendo la fuerza (F), medida por la celda de carga, por el valor de la aceleración de la gravedad en el local de fabricación (g_{ref}).

$$\left(\frac{u_{map}}{m_{ap}}\right)^2 = \left(\frac{u_{mo}}{m_o}\right)^2 + \left(\frac{u_{ar}}{\rho_{ar} - \rho_o}\right)^2 \quad (32)$$

En la expresión anterior:

u_{map} : Incertidumbre asociada a la masa aparente;

m_{ap} : Masa aparente;

u_{mo} : Incertidumbre asociada a la masa del objeto;

m_o : Masa del objeto;

u_{ar} : Incertidumbre asociada a la masa del aire;

ρ_{ar} : Masa específica del aire;

ρ_o : Masa específica del objeto.

- La columna relacionada con la **Temperatura ambiente** denota el valor medido con el termómetro utilizado para tal medición. La incertidumbre asociada a la medición de la temperatura ambiente puede ser obtenida dividiéndose la incertidumbre expandida reportada en el certificado de calibración por el factor de cobertura. Este valor es constante para cualquier valor de temperatura indicado en un intervalo de confianza de 95,45%.
- La columna relacionada a la **Presión atmosférica** denota el valor medido con el medidor de presión barométrica. La incertidumbre asociada a la medición de la presión atmosférica puede ser obtenida dividiéndose la mitad resolución del instrumento por la raíz de tres, para asociar esta resolución a una distribución rectangular de probabilidad. Este valor es constante para cualquier valor de presión atmosférica medido para un intervalo de confianza de 95%.
- Finalmente, con los valores medidos de temperatura ambiente y presión atmosférica en cada punto experimental obtenido, se puede estimar la **densidad del aire (masa específica)** que envuelve la masa patrón para cada

uno de los puntos evaluados. Para tal propósito se aplica la siguiente expresión:

$$\rho_{ar} = \frac{P_{atm}}{R_{ar} \cdot T_{amb}} \quad (33)$$

En esta expresión:

- ρ_{ar} : Masa específica del aire;
- P_{atm} : Presión atmosférica;
- R_{ar} : Constante universal del aire (287,0028 J/kg·K);
- T_{amb} : Temperatura ambiente;

Con relación a la incertidumbre asociada a la masa específica, fue aplicado el principio de propagación de la incertidumbre de medición, principio este consagrado y establecidos en la ISO GUM (2008). De esa forma, los autores de presente trabajo de grado, dedujeron la siguiente expresión para realizar el cálculo de la incertidumbre asociada a la masa específica del aire, para una confiabilidad del 95%:

$$\left(\frac{u_{\rho_{ar}}}{\rho_{ar}}\right)^2 = \left(\frac{u_{patm}}{P_{atm}}\right)^2 + \left(\frac{u_{Tamb}}{T_{amb}}\right)^2 \quad (34)$$

En esta expresión:

- $u_{\rho_{ar}}$: Incertidumbre asociada a la masa específica del aire;
- ρ_{ar} : Masa específica del aire;
- u_{patm} : Incertidumbre asociada a la presión atmosférica;
- P_{atm} : Presión atmosférica;
- u_{Tamb} : Incertidumbre asociada a la temperatura ambiente;
- T_{amb} : Temperatura ambiente.

En seguida, aplicándose el método de los mínimos cuadrados ordinarios, es posible determinar las distintas curvas de calibración. A manera de ejemplo, la Figura 16 ilustra la curva de calibración para un polinomio lineal.

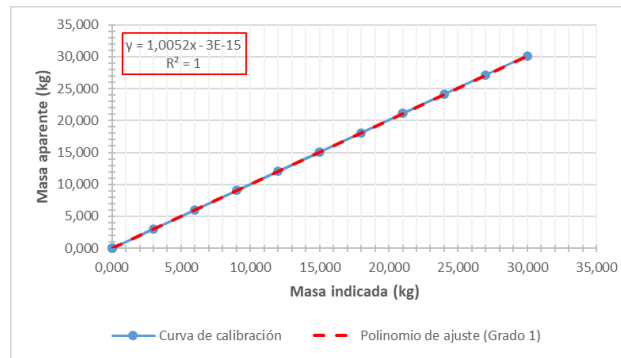


Figura 16 – Curva de calibración de un polinomio lineal
Fuente: Autores

Finalmente, una vez determinada la incertidumbre de ajuste y haber escogido el mejor polinomio, la herramienta de cálculo elaborado permite reportar una tabla de resultados finales que computa, tanto los valores ajustados, como las incertidumbres asociadas con los errores de la calibración. La Tabla 16 ilustra esta situación. Enseguida, es posible notar que la herramienta de cálculo diseñada permita la salida gráfica de los resultados, donde se pueden observar los comportamientos y perfiles, asociados a los errores y la incertidumbre de medición. Las Figuras 17 y 18 ilustran esta situación tanto para la carga ascendente, como para la carga descendente

Tabla 16 – Resultados del análisis de incertidumbre

	Puntos	RESULTADO FINAL							
		Masa Indicada	Masa ajustada	Incertidumbre de ajuste	Incertidumbre del patrón	Incertidumbre del instrumento	Incertidumbre patrón (u)	Incertidumbre Expandida (U)	Error
		kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg
CARGA ASCENDENTE	1	0,001	0,001	0,00020	0,00000	0,00058	0,0006	0,0012	0,0000
	2	2,997	3,013	0,00020	0,00000186	0,00058	0,0006	0,0012	-0,0156
	3	5,993	6,024	0,00020	0,0000042	0,00058	0,0006	0,0012	-0,0312
	4	8,998	9,045	0,00020	0,0000048	0,00058	0,0006	0,0012	-0,0468
	5	11,977	12,039	0,00020	0,0000087	0,00058	0,0006	0,0012	-0,0623
	6	14,964	15,078	0,00020	0,0000095	0,00058	0,0006	0,0012	-0,1140
	7	17,996	18,094	0,00020	0,0000096	0,00058	0,0006	0,0012	-0,0976
	8	20,992	21,109	0,00020	0,0000165	0,00058	0,0006	0,0012	-0,1172
	9	23,994	24,125	0,00020	0,0000167	0,00058	0,0006	0,0012	-0,1308
	10	26,989	27,140	0,00020	0,0000171	0,00058	0,0006	0,0012	-0,1514
	11	29,987	30,156	0,00020	0,0000186	0,00058	0,0006	0,0012	-0,1690
CARGA DESCENDENTE	12	0,000	0,000	0,00020	0,0000000	0,00058	0,0006	0,0012	-0,0001
	13	3,000	3,016	0,00020	0,0000019	0,00058	0,0006	0,0012	-0,0156
	14	6,000	6,031	0,00020	0,0000042	0,00058	0,0006	0,0012	-0,0312
	15	9,000	9,047	0,00020	0,0000048	0,00058	0,0006	0,0012	-0,0468
	16	12,000	12,062	0,00020	0,0000087	0,00058	0,0006	0,0012	-0,0624
	17	15,000	15,078	0,00020	0,0000095	0,00058	0,0006	0,0012	-0,0780
	18	18,000	18,094	0,00020	0,0000096	0,00058	0,0006	0,0012	-0,0936
	19	21,000	21,109	0,00020	0,0000165	0,00058	0,0006	0,0012	-0,1092
	20	24,000	24,125	0,00020	0,0000167	0,00058	0,0006	0,0012	-0,1248
	21	27,000	27,140	0,00020	0,0000171	0,00058	0,0006	0,0012	-0,1404
	22	30,000	30,156	0,00020	0,000019	0,00058	0,0006	0,0012	-0,1560

Fuente: Autores



Figura 17 – Curva de resultados de carga ascendente
Fuente: Autores

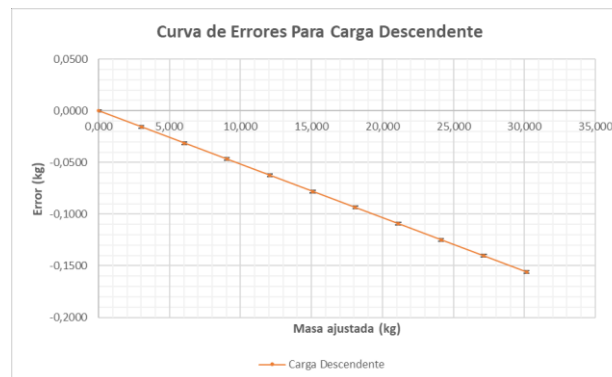


Figura 18 – Curva de resultados de carga descendente
Fuente: Autores

5.4 Influencia de la calibración de los sensores de temperatura en el motor

Realizada la calibración de los sensores de temperatura, es posible apreciar que una variación del porcentaje de error (considerando que sea el mismo porcentaje para todos los sensores) entre 1% y 5%, no tendrá impacto en la eficiencia del motor, pero si en el flujo de calor de la combustión y el rechazado al ambiente. A partir de la Ecuación (3) definida en el capítulo 2, se puede apreciar que un factor multiplicador del error en todos los sensores, caso sea el mismo factor, al final no acaba impactando en la eficiencia térmica, porque esos valores se acaban cancelando. Por otro lado, si cada sensor tiene un error distinto, esto si impacta de forma significativa en la eficiencia del motor. La tabla a

seguir muestra los valores típicos del comportamiento en un motor de combustión interna, así como los cálculos correspondientes al flujo de calor en la combustión (Q_{in}) y el flujo de calor en el proceso de escape (Q_{out}). La eficiencia térmica también fue calculada (η_t).

Tabla 17 – Valores típicos de temperatura en un motor de combustión

Unidad	T1	T2	T3	T4	Cv	Qin	Qout	Qin - Qout	η_t
°C	27	300	500	160	0,8	160	106,4	53,6	33,5%
K	300,15	573,15	773,15	433,15	0,8	160	106,4	53,6	33,5%

Fuente: Autores

Analizando valores típicos de errores que pueden obtenerse en la calibración de un instrumento de medición de temperatura, fueron analizadas cinco situaciones distintas, variando el error desde 1% hasta 5%. La Tabla 18 indica los porcentajes de error para cada caso, así como el correspondiente valor tanto en grados Celsius como en Kelvin. Esos valores corresponden a los porcentajes en relación de los valores de temperatura definidos en la Tabla 17.

Tabla 18 – Porcentaje de error obtenido en la calibración de los sensores

% error	Unidad	T1	T2	T3	T4
1%	°C	0,27	3,00	5,00	1,60
1%	K	3,00	5,73	7,73	4,33
2%	°C	0,54	6,00	10,00	3,20
2%	K	6,00	11,46	15,46	8,66
3%	°C	0,81	9,00	15,00	4,80
3%	K	9,00	17,19	23,19	12,99
4%	°C	1,08	12,00	20,00	6,40
4%	K	12,01	22,93	30,93	17,33
5%	°C	1,35	15,00	25,00	8,00
5%	K	15,01	28,66	38,66	21,66

Fuente: Autores

A partir de los errores típicos que pueden obtenerse en una calibración, la Tabla 19 muestra los resultados consolidados para los distintos valores de Q_{in} y Q_{out} que pueden obtenerse. Además, se puede apreciar que a pesar que estos valores son cambiantes y, estos cambios impactan en el análisis térmico-ambiental del motor, la eficiencia térmica se

mantiene invariable. Lo que es coherente con la Ecuación (3), para la situación donde los porcentajes de error de los sensores sean iguales, tal como se mencionó anteriormente.

Tabla 19 – influencia del error de calibración en Q_{in} , Q_{out} y η_t

% error	Unidad	T1	T2	T3	T4	Cv	Q_{in}	Q_{out}	$Q_{in} - Q_{out}$	η_t
1%	°C	27,27	303,00	505,00	161,60	0,8	161,60	107,46	54,14	33,5%
1%	K	303,15	578,88	780,88	437,48	0,8	161,60	107,46	54,14	33,5%
2%	°C	27,54	306,00	510,00	163,20	0,8	163,20	108,53	54,67	33,5%
2%	K	306,15	584,61	788,61	441,81	0,8	163,20	108,53	54,67	33,5%
3%	°C	27,81	309,00	515,00	164,80	0,8	164,80	109,59	55,21	33,5%
3%	K	309,15	590,34	796,34	446,14	0,8	164,80	109,59	55,21	33,5%
4%	°C	28,08	312,00	520,00	166,40	0,8	166,40	110,66	55,74	33,5%
4%	K	312,16	596,08	804,08	450,48	0,8	166,40	110,66	55,74	33,5%
5%	°C	28,35	315,00	525,00	168,00	0,8	168,00	111,72	56,28	33,5%
5%	K	315,16	601,81	811,81	454,81	0,8	168,00	111,72	56,28	33,5%

Fuente: Autores

A partir de los errores típicos que pueden obtenerse en una calibración, la Tabla 19 muestra los resultados consolidados para los distintos valores de Q_{in} y Q_{out} que pueden obtenerse. Además, se puede apreciar que a pesar que estos valores son cambiantes y, estos cambios impactan en el análisis térmico-ambiental del motor, la eficiencia térmica se mantiene invariable. Lo que es coherente con la Ecuación (3), para la situación donde los porcentajes de error de los sensores sean iguales, tal como se mencionó anteriormente.

Por otro lado, la Figura 19 ilustra el aumento que se produce en los parámetros Q_{in} y Q_{out} del motor, conforme se aumenta el error asociado a la calibración de los sensores de temperatura.

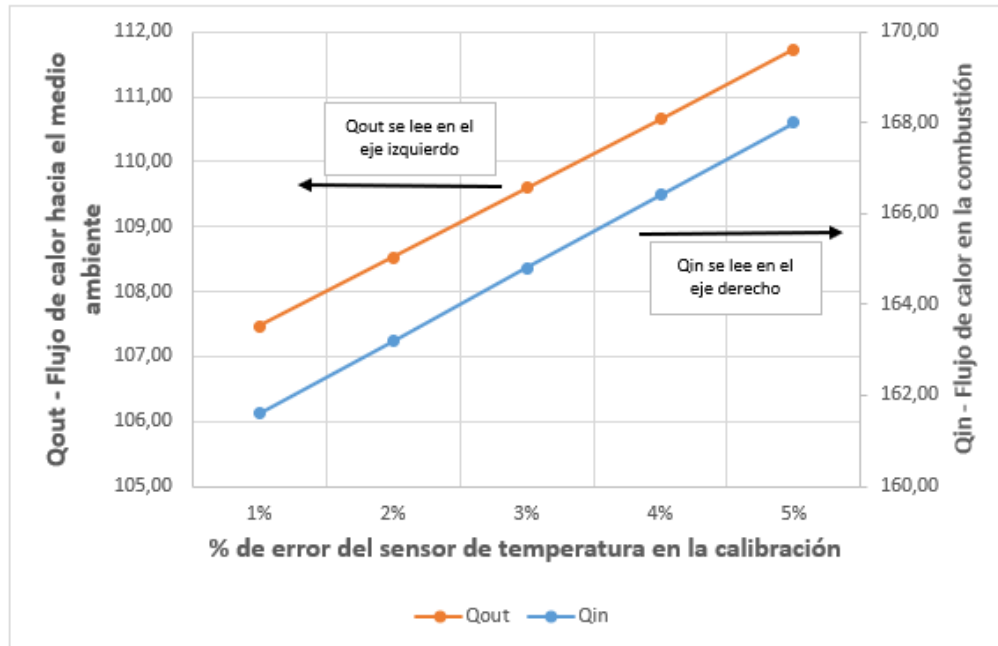


Figura 19 – Impacto del error de calibración en los parámetros Qin y Qout
Fuente: Autores

Para el caso de Qin (curva en azul) un aumento de su valor requiere, ciertamente, una mayor de inyección de energía en el proceso de combustión, lo que se transforma, incuestionablemente, en un impacto económico no deseado en el funcionamiento del motor. De ahí la importancia de realizar una calibración rigurosa desde el punto de vista metrológico con el fin de no aumentar los costos asociados a la operación del motor de combustión. En la misma Figura 19 se puede observar el aumento del valor de Qout (curva en color naranja). Este parámetro está directamente asociado con el impacto ambiental, una vez que hace parte del calor emitido al medio ambiente. De esta forma se observa que un error muy alto obtenido en la calibración de los sensores de temperatura, contribuye a que el flujo de calor asociado a los gases de escape esté en un constante aumento. De esta forma, es posible verificar la importancia de calibrar de forma adecuada los sensores de temperatura en un motor de combustión interna.

6. Conclusiones y recomendaciones

Este trabajo de grado permitió elaborar una herramienta de cálculo que permite evaluar la confiabilidad metrológica de magnitudes mecánicas (Temperatura y Masa), las cuales son críticas para la operación y caracterización del motor de combustión interna del laboratorio de experimentos en la UAN-Sede Puerto Colombia. La consolidación de los objetivos originalmente formulados permitió obtener el objetivo general perseguido en la investigación: *Diseñar una herramienta de cálculo para evaluar la confiabilidad metrológica del sistema térmico y gravimétrico del motor de combustión interna de la UAN-Sede Puerto Colombia.*

En relación al primer objetivo específico *–Programar un sistema de automatización PLC (Programmable Logic Controller) que permita el control de temperatura de los procesos asociados al motor de combustión interna–* se consiguió programar un nuevo sistema de automatización PLC que controle los parámetros de temperatura en el motor de combustión. Este nuevo sistema contribuye a la operación segura del motor, una vez que permite la activación del sistema de refrigeración mediante el encendido del ventilador cuando la temperatura del motor alcanza los 80 °C. Adicionalmente, los ventiladores estarán encendidos hasta cuando la temperatura baje a la temperatura configurada en el controlador digital debajo de 40 °C.

Por otra parte, con relación a las herramientas de cálculo elaboradas (*Segundo objetivo específico: elaborar una herramienta de cálculo en Excel que permita evaluar la confiabilidad metrológica del sistema de medición de temperatura en el motor de combustión interna; Tercer objetivo específico: elaborar una herramienta de cálculo en Excel que permita evaluar la confiabilidad metrológica del sistema gravimétrico utilizado*

para la medición del consumo específico de combustible), éstas se mostraron robustas y confiables para evaluar los parámetros asociados a la medición de temperatura y masa, i.e.: valores ajustados, errores e incertidumbres. Estos parámetros son fundamentales para conocer, dentro de un nivel de confianza, la exactitud y la precisión de la eficiencia térmica, el consumo de combustible, la potencia del motor, entre otros aspectos importantes que deben ser realizados de forma experimental en trabajos futuros.

Finalmente, se destaca que este trabajo de grado mediante operaciones de mantenimiento realizadas mostró que es posible caracterizar, evaluar y utilizar el motor de combustión interna para actividades académicas e investigativas. En el curso de la parte experimentalmente, se realizó el cambio de combustible, así como mantenimiento correctivo del carburador, lo que permitió el encendido del motor.

Para trabajos futuros, se recomienda realizar el trabajo experimental de la calibración y hacer uso de las planillas de cálculos para conocer los errores y las incertidumbres de los sensores de temperatura, así como del sistema gravimétrico que deben ser instalado. Adicionalmente, se recomienda caracterizar los parámetros termodinámicos asociados al motor de combustión interna, modificando el tipo de combustible, las RPM y evaluando el consumo de combustible, entre otras actividades relevantes que pueden ser realizadas tanto en el plano académico, como en el plano de la ciencia, tecnología e investigación

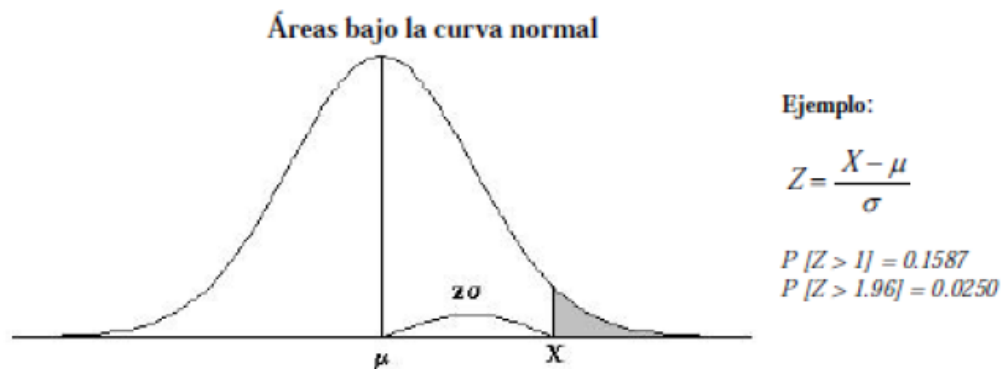
Bibliografía

- [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).
- [12] Acebes, S. S. (2007). Motores. Editex.

- [13] Melchor, J. C. R. (2013). *Mantenimiento de sistemas auxiliares del motor de ciclo Otto. TMVG0409*. IC Editorial.
- [14] Guerrero Palacios, T. F. (2016). *Determinación de la degradación y contaminación del aceite de motores Otto en función del kilometraje recorrido* (Master's thesis, Universidad del Azuay).
- [15] Díaz Mejía, F. E. (2017). *Elaboración de una base de datos para la detección de fallos del sistema de encendido de un motor Otto Chevrolet Aveo 1.6 L DOHC a través del procesamiento estadístico de las señales del oscilograma de encendido y sensor MAP* (Bachelor's thesis).
- [16] Pardiñas, J., & Feijó, R. (2018). *Sistemas auxiliares del motor (2018)*. Editex.
- [17] Puchades, H. C. (2004). *Modelado unidimensional de los motores de dos tiempos de pequeña cilindrada*. Reverté.
- [18] Foale, T. (2003). *Motocicletas Comportamiento dinamico y diseño de chasis*. Tony Foale.
- [19] Womack, J. P., Jones, D. T., & Roos, D. (2017). *La máquina que cambió el mundo: La historia de la Produccion Lean, el arma secreta de Toyota que revoluciono la industria mundial del automóvil*. Profit Editorial.
- [20] Rocha-Hoyos, J. C., Llanes-Cedeño, E. A., Celi-Ortega, S. F., & Peralta-Zurita, D. C. (2019). Efecto de la Adición de Biodiésel en el Rendimiento y la Opacidad de un Motor Diésel. *Información tecnológica*, 30(3), 137-146.
- [21] Kindelán, J. C., & Martínez, J. M. L. (2020). Los motores rotativos Wankel, pasado, presente y futuro. *DYNA*, 95(1), 8-11.
- [22] VIM. International Vocabulary of Metrology Basic and general concepts and associated terms - JCGM 200:2012.
- [23] MAURIS, G. Propagation of measurement uncertainty expressed by a possibility distribution with coverage-interval-based semantics. XVIII IMEKO WORLD CONGRESS. Metrology for a sustainable development. Brazil. 2006
- [24] DE ANDRADE, B. Estudo das incertezas na medição de espessura por ultrassom em peças aeronáuticas. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ. 2012

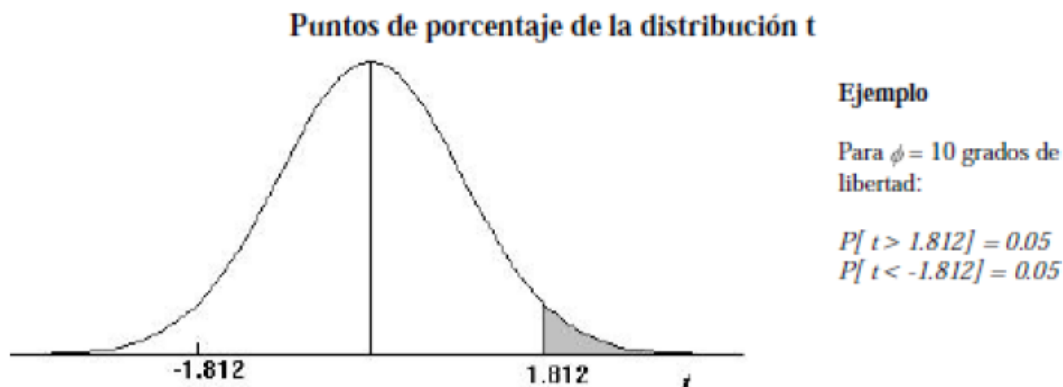
- [25] ISO GUM: Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement. JCGM:100. 2008.
- [26] CASTRO. J. Aseguramiento metrológico en ISO 9000. Instituto Nacional de Defensa de la Competencia y de la Protección de la Propiedad Intelectual (INDECOPI). Lima, Perú. 2007
- [27] CASTRO S. R. Tópicos avançados de incerteza de medição. Aula 16. PósMQI. PUC-Rio.2016.
- [28] Spiegel, M. R. (1991). Estadística. McGraw-Hill Interamericana.
- [29] Hernández-Vásquez, J. D., *Cálculo de incertezas associadas a medições de pressão, temperatura e vazão de fluidos de trabalho de trocadores tubulares e incorporação dos resultados das calibrações no output do sistema monitoramento remoto da usina Fontes Nova*. Subsídio ao desenvolvimento das Etapas 3 e 4, Ano 2, do Projeto de P&D intitulado Cabeça de série de um sistema inovador de limpeza de trocadores de calor de hidro geradores. Agosto, 2018.
- [30] Frota, M. N., Hernández-Vásquez, J. D., Castro-Pacheco, E. R., Germano, S. B., & Jr, J. B. *Enhancing the effectiveness of hydro generator heat exchangers through the control of measurement uncertainties*. Heat Exchanger Fouling and Cleaning – 2019.
- [31] Pedraza-Yepes, C., Hernández-Vásquez, J. D., Higuera-Cobos, O. F., Gómez, G. R., & López, U. O. (2018). Comparison of Alternatives for Digital Scales' Calibration According to Guide SIM.
- [32] SIM Inter-American Metrology System, Guidelines on the Calibration of NonAutomatic Weighing Instruments, 2009.
- [33] OIML. Recommendation, R 76-1: Nonautomatic Weighing Instruments, Part 1: Metro Logical And Technical Requirements-Tests, OIML, Paris, 2006

Anexo A: Tabla de una Distribución Normal



Desv. normal x	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0.0	0.5000	0.4980	0.4960	0.4880	0.4840	0.4801	0.4761	0.4721	0.4681	0.4641
0.1	0.4602	0.4582	0.4522	0.4483	0.4443	0.4404	0.4364	0.4325	0.4286	0.4247
0.2	0.4207	0.4168	0.4129	0.4090	0.4052	0.4013	0.3974	0.3936	0.3897	0.3859
0.3	0.3821	0.3783	0.3745	0.3707	0.3669	0.3632	0.3594	0.3557	0.3520	0.3483
0.4	0.3446	0.3409	0.3372	0.3336	0.3300	0.3264	0.3228	0.3192	0.3156	0.3121
0.5	0.3085	0.3050	0.3015	0.2981	0.2946	0.2912	0.2877	0.2843	0.2810	0.2776
0.6	0.2743	0.2709	0.2676	0.2643	0.2611	0.2578	0.2546	0.2514	0.2483	0.2451
0.7	0.2420	0.2389	0.2358	0.2327	0.2296	0.2266	0.2236	0.2206	0.2177	0.2148
0.8	0.2119	0.2090	0.2061	0.2033	0.2005	0.1977	0.1949	0.1922	0.1894	0.1867
0.9	0.1841	0.1814	0.1788	0.1762	0.1736	0.1711	0.1685	0.1660	0.1635	0.1611
1.0	0.1587	0.1562	0.1539	0.1515	0.1492	0.1469	0.1446	0.1423	0.1401	0.1379
1.1	0.1357	0.1335	0.1314	0.1292	0.1271	0.1251	0.1230	0.1210	0.1190	0.1170
1.2	0.1151	0.1131	0.1112	0.1093	0.1075	0.1056	0.1038	0.1020	0.1003	0.0985
1.3	0.0968	0.0951	0.0934	0.0918	0.0901	0.0885	0.0869	0.0853	0.0838	0.0823
1.4	0.0808	0.0793	0.0778	0.0764	0.0749	0.0735	0.0721	0.0708	0.0694	0.0681
1.5	0.0668	0.0655	0.0643	0.0630	0.0618	0.0606	0.0594	0.0582	0.0571	0.0559
1.6	0.0548	0.0537	0.0526	0.0516	0.0505	0.0495	0.0485	0.0475	0.0465	0.0455
1.7	0.0446	0.0436	0.0427	0.0418	0.0409	0.0401	0.0392	0.0384	0.0375	0.0367
1.8	0.0359	0.0351	0.0344	0.0336	0.0329	0.0322	0.0314	0.0307	0.0301	0.0294
1.9	0.0287	0.0281	0.0274	0.0268	0.0262	0.0256	0.0250	0.0244	0.0239	0.0233
2.0	0.0228	0.0222	0.0217	0.0212	0.0207	0.0202	0.0197	0.0192	0.0188	0.0183
2.1	0.0179	0.0174	0.0170	0.0166	0.0162	0.0158	0.0154	0.0150	0.0146	0.0143
2.2	0.0139	0.0136	0.0132	0.0129	0.0125	0.0122	0.0119	0.0116	0.0113	0.0110
2.3	0.0107	0.0104	0.0102	0.0099	0.0096	0.0094	0.0091	0.0089	0.0087	0.0084
2.4	0.0082	0.0080	0.0078	0.0075	0.0073	0.0071	0.0069	0.0068	0.0066	0.0064
2.5	0.0062	0.0060	0.0059	0.0057	0.0055	0.0054	0.0052	0.0051	0.0049	0.0048
2.6	0.0047	0.0045	0.0044	0.0043	0.0041	0.0040	0.0039	0.0038	0.0037	0.0036
2.7	0.0035	0.0034	0.0033	0.0032	0.0031	0.0030	0.0029	0.0028	0.0027	0.0026
2.8	0.0026	0.0025	0.0024	0.0023	0.0023	0.0022	0.0021	0.0021	0.0020	0.0019
2.9	0.0019	0.0018	0.0018	0.0017	0.0016	0.0016	0.0015	0.0015	0.0014	0.0014
3.0	0.0013	0.0013	0.0013	0.0012	0.0012	0.0011	0.0011	0.0011	0.0010	0.0010

Anexo B: Tabla de una Distribución t-student



α Γ	0,25	0,2	0,15	0,1	0,05	0,025	0,01	0,005	0,0005
1	1,000	1,376	1,963	3,078	6,314	12,706	31,821	63,656	636,578
2	0,816	1,061	1,386	1,886	2,920	4,303	6,965	9,925	31,600
3	0,765	0,978	1,250	1,638	2,353	3,182	4,541	5,841	12,924
4	0,741	0,941	1,190	1,533	2,132	2,776	3,747	4,604	8,610
5	0,727	0,920	1,156	1,476	2,015	2,571	3,365	4,032	6,869
6	0,718	0,906	1,134	1,440	1,943	2,447	3,143	3,707	5,959
7	0,711	0,896	1,119	1,415	1,895	2,365	2,998	3,499	5,408
8	0,706	0,889	1,108	1,397	1,860	2,306	2,896	3,355	5,041
9	0,703	0,883	1,100	1,383	1,833	2,262	2,821	3,250	4,781
10	0,700	0,879	1,093	1,372	1,812	2,228	2,764	3,169	4,587
11	0,697	0,876	1,088	1,363	1,796	2,201	2,718	3,106	4,437
12	0,695	0,873	1,083	1,356	1,782	2,179	2,681	3,055	4,318
13	0,694	0,870	1,079	1,350	1,771	2,160	2,650	3,012	4,221
14	0,692	0,868	1,076	1,345	1,761	2,145	2,624	2,977	4,140
15	0,691	0,866	1,074	1,341	1,753	2,131	2,602	2,947	4,073
16	0,690	0,865	1,071	1,337	1,746	2,120	2,583	2,921	4,015
17	0,689	0,863	1,069	1,333	1,740	2,110	2,567	2,898	3,965
18	0,688	0,862	1,067	1,330	1,734	2,101	2,552	2,878	3,922
19	0,688	0,861	1,066	1,328	1,729	2,093	2,539	2,861	3,883
20	0,687	0,860	1,064	1,325	1,725	2,086	2,528	2,845	3,850
21	0,686	0,859	1,063	1,323	1,721	2,080	2,518	2,831	3,819
22	0,686	0,858	1,061	1,321	1,717	2,074	2,508	2,819	3,792
23	0,685	0,858	1,060	1,319	1,714	2,069	2,500	2,807	3,768
24	0,685	0,857	1,059	1,318	1,711	2,064	2,492	2,797	3,745
25	0,684	0,856	1,058	1,316	1,708	2,060	2,485	2,787	3,725
26	0,684	0,856	1,058	1,315	1,706	2,056	2,479	2,779	3,707
27	0,684	0,855	1,057	1,314	1,703	2,052	2,473	2,771	3,689
28	0,683	0,855	1,056	1,313	1,701	2,048	2,467	2,763	3,674
29	0,683	0,854	1,055	1,311	1,699	2,045	2,462	2,756	3,660
30	0,683	0,854	1,055	1,310	1,697	2,042	2,457	2,750	3,646