



# **Análisis térmico-económico de un motor de combustión interna a partir del uso de dos distintos combustibles disponibles comercialmente en el sector del transporte colombiano**

**Raúl Eduardo Camargo Suarez**  
**Harold Miguel Sarmiento Quintero**

Universidad Antonio Nariño  
Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica  
Puerto Colombia, Colombia  
2022



# **Análisis térmico-económico de un motor de combustión interna a partir del uso de dos distintos combustibles disponibles comercialmente en el sector del transporte colombiano**

**Raúl Eduardo Camargo Suarez**  
**Harold Miguel Sarmiento Quintero**

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

Director:

PhD. José Daniel Hernández Vásquez

Línea de Investigación:

Energía

Grupo de Investigación:

GI-Fourier

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

2022



Dedicados a nuestras familias, amigos y profesores que nos apoyaron incansablemente en esta lucha para alcanzar este gran logro que se avecina.

En estos momentos difíciles que vivimos en nuestra vida por el covid-19 que ha alterado nuestra rutina, pero ni este gran problema nos ha hecho bajar los brazos para luchar por nuestros sueños. Hemos podido vencer obstáculos y poder culminar con éxito nuestra etapa de estudiantes por el momento para alcanzar la meta de ser unos profesionales.

*"Dando pasos hacia delante para lograr el triunfo"*

*Raúl Eduardo Camargo Suarez*

*Harold Miguel Sarmiento Quintero*



## Agradecimientos

Primeramente, a Dios por haber nacido, bendecirnos cada día con vida y salud.

A nuestra Madre por ser un apoyo incondicional desde mi etapa escolar hasta llegar a esta que ya culminó. A nuestro padre por siempre tener su energía positiva y sus buenos consejos para seguir adelante en mis estudios. A la **Virgen María por ser la madre de Dios** y guiarnos por este camino emprendedor, ella lo ha hecho todo.

Agradecemos, de manera muy especial a nuestro profesor José Daniel Hernández Vásquez por su orientación y enseñanzas a lo largo del proyecto, y una mención al profesor Jonathan Fábregas por compartir su conocimiento y ayudarnos a forjar esta carrera.

A nuestra institución Universidad Antonio Nariño Sede Puerto Colombia por permitirnos hacer parte de esta carrera y servir como base para culminar este gran sueño que se avecina.

*Raúl Eduardo Camargo Suarez*

*Harold Miguel Sarmiento Quintero*



## Resumen

Este TIG se encuentra enmarcado dentro de un proyecto de investigación aprobado por la Vicerrectoría de Ciencia, Tecnología e Innovación de la Universidad Antonio Nariño. El proyecto No 2022008 titulado: “Desarrollo de técnicas estadísticas para el análisis de incertidumbre y desempeño metrológico en equipos industriales” busca evaluar la confiabilidad metrológica de equipos industriales. En ese sentido, este TIG tiene como objetivo principal conocer el desempeño térmico de un motor de combustión interna y, así mismo, realizar un análisis económico a partir del uso de dos tipos de combustibles utilizados en el sector transporte colombiano, i.e.: gasolina corriente y gasolina extra. La motivación principal para este estudio nace de la problemática identificada en la operación del motor de combustión de la UAN, el cual requiere conocer los parámetros de desempeño a partir del uso de diversos tipos de combustibles. Se espera, adicionalmente, hacer uso de métodos multicriterio tipo AHP para realizar el análisis económico del proceso. Finalmente, se espera que los resultados del proyecto contribuyan a conocer las condiciones de operación del motor de combustión interna. Así mismo, se espera la publicación de artículos científicos en una revista SCOPUS en el marco del proyecto de investigación aprobado por la VCTI.

**Palabras clave:** Motor de combustión interna, método multicriterio, AHP, calibración, metrología.

## Abstract

This TIG is part of a research project approved by the Vice President for Science, Technology and Innovation of the Antonio Nariño University. Project No 2022008 entitled: "Development of statistical techniques for the analysis of uncertainty and metrological performance in industrial equipment" seeks to evaluate the metrological reliability of industrial equipment. In this sense, this TIG has as its main objective to know the thermal performance of an internal combustion engine and, likewise, to carry out an economic analysis based on the use of two types of fuels used in the Colombian transport sector, i.e.: regular gasoline and extra gasoline. The main motivation for this study arises from the problems identified in the operation of the UAN combustion engine, which requires knowing the performance parameters from the use of various types of fuels. Additionally, it is expected to use AHP-type multi-criteria methods to carry out the economic analysis of the process. Finally, it is expected that the results of the project will contribute to knowing the operating conditions of the internal combustion engine. Likewise, the publication of scientific articles in a SCOPUS journal is expected within the framework of the research project approved by the VCTI.

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

# Contenido

<b>1. Introducción .....</b>	<b>14</b>
1.1    Formulación del problema.....	16
1.2    Objetivos.....	16
1.2.1    Objetivo general.....	16
1.2.2    Objetivos específicos.....	17
1.3    Justificación .....	17
1.4    Diseño metodológico.....	18
<b>2. Contexto energético a nivel nacional e internacional del sector transporte.....</b>	<b>20</b>
<b>3. Fundamentos de los métodos multicriterio para la toma de decisión ..</b>	<b>25</b>
<b>4. Resultados y discusión .....</b>	<b>28</b>
4.1    Cálculo de la incertidumbre asociada al consumo específico de combustible.....	28
4.2    Curvas características de operación del motor en función del tipo de combustible.....	38
4.2.1    Análisis del consumo de combustible .....	39
4.2.2    Cálculo del calor de entrada al sistema, calor de salida y trabajo realizado .....	41
4.2.3    Eficiencia térmica en función del tipo de combustible .....	44
4.3    Aplicación del método multicriterio Fuzzy-AHP para el análisis económico del proceso .....	45
<b>5. Conclusiones y recomendaciones .....</b>	<b>51</b>
<b>    Apéndice A: Cálculos intermedarios para la determinación del error cuadrático .....</b>	<b>53</b>
<b>    Apéndice B: Cálculos para la eficiencia térmica del motor de combustión interna.....</b>	<b>56</b>
<b>Bibliografía.....</b>	<b>60</b>

## Lista de figuras

Figura 1. Cambios anuales en la intensidad global de energía primaria .....	21
Figura 2. Intervención en el gasto de energía en sector industrial .....	22
Figura 3. Distribución del consumo por energético en el sector transporte - 2015 .....	24
Figura 4. Balanza Trumax para la medición del consumo específico de combustible.....	28
Figura 5. Polinomio de primer grado.....	33
Figura 6. Polinomio de segundo grado .....	33
Figura 7. Polinomio de tercer grado.....	34
Figura 8. Curva de calibración para la inyección de combustible .....	37
Figura 9. Curva de calibración para el consumo de combustible .....	37
Figura 10. Comparación entre el consumo específico de combustible.....	40
Figura 11. Comparación entre el consumo volumétrico de combustible .....	41
<b>Figura 12</b> – Calor de entrada al sistema ( $Q_{in}$ ) y calor de salida del sistema ( $Q_{out}$ ) .....	43
<b>Figura 13</b> – Trabajo realizado .....	43
<b>Figura 14</b> – Eficiencia térmica del motor en función del combustible y ecuación de rendimiento.....	44
Figura 15 - Gráfico radar con la identificación del CCI para cada alternativa.....	50

## Lista de tablas

<b>Tabla 1</b> – Métodos multicriterio de apoyo a la decisión.....	27
<b>Tabla 2</b> – Factores utilizados para la calibración.....	29
<b>Tabla 3</b> – Datos experimentales (carga ascendente y descendente) .....	29
<b>Tabla 4</b> – Masas patrón para el proceso de calibración.....	30
<b>Tabla 5</b> – Incertidumbre de medición de las masas patrón.....	30
<b>Tabla 6</b> – Resultados de la calibración para la carga ascendente.....	31
<b>Tabla 7</b> – Resultados de la calibración para la carga ascendente.....	32
<b>Tabla 8</b> – Resultado del cálculo de la incertidumbre del ajuste .....	34
<b>Tabla 9</b> – Resultado final de la calibración .....	35
<b>Tabla 10</b> – Datos de medición para gasolina corriente .....	38
<b>Tabla 11</b> – Datos de medición para gasolina extra .....	39
<b>Tabla 12</b> – Consumo específico y volumétrico de combustible para la gasolina corriente .....	40
<b>Tabla 13</b> – Consumo específico y volumétrico de combustible para la gasolina extra.....	40
<b>Tabla 14</b> – Calor de entrada y el calor de salida del sistema – gasolina corriente .....	41
<b>Tabla 15</b> – Calor de entrada y el calor de salida del sistema – gasolina extra...	42
Tabla 16 – Matriz de comparación <i>Fuzzy</i> – Criterios.....	45
Tabla 17 – Matriz de comparación <i>Fuzzy</i> – Subcriterios subordinados al criterio Económico.....	45
Tabla 18 – Matriz de comparación <i>Fuzzy</i> – Subcriterios subordinados al criterio Ambiental .....	45
Tabla 19 – Matriz de comparación <i>Fuzzy</i> – Subcriterios subordinados al criterio Técnico.....	46
Tabla 20 – Cálculo de IC, IR y RC para las matrices de criterios e subcriterios.	46
Tabla 21 – Pesos de los criterios por el método FAHP .....	46
Tabla 22 – Pesos de los subcriterios por el método FAHP .....	47
<b>Tabla 23</b> – Matriz de decisión <i>D</i> : evaluación de alternativas .....	48
Tabla 24 – Peso total de los subcriterios por el método <i>Fuzzy</i> AHP ( <i>W<sub>Total</sub></i> )..	48
Tabla 25 – Matriz de decisión normalizada y ponderada por el método <i>Fuzzy</i> AHP ( <i>V</i> ).....	49
Tabla 26 – Matriz de distancia total positiva y negativa.....	49
Tabla 27 – Cálculo del coeficiente de proximidad.....	50

# 1. Introducción

El sistema de transporte terrestre, debido a los múltiples factores negativos que enfrenta, es inevitable su transición hacia tecnologías más sostenibles. En la mayoría de los países se están llevando a cabo acciones políticas para frenar la contaminación ambiental ocasionada en gran medida por la producción de combustibles fósiles, creando alternativas que, no solo den solución al problema ambiental, sino también al ámbito socio-económico, mejorando así la calidad de vida de los usuarios. En la actualidad, gracias a acuerdos entre países y con la implementación de políticas de eficiencia energética se han logrado programas gubernamentales que fomentan el uso racional de los recursos. La evaluación y posterior elección de alternativas que satisfagan los requerimientos técnicos, tecnológicos, sociales y económicos es la dirección que sigue este proyecto, en el cual se aplicaran métodos multicriterio de apoyo a la decisión para lograr satisfactoriamente los objetivos trazados, cuyos principales beneficios se destacan a continuación:

- (i) Implementación de un sistema de transporte terrestre sostenible, el cual permitirá a los usuarios disfrutar de innumerables beneficios, mejora en las vías de acceso urbanas y rurales, acortando así el tiempo de conexión intermunicipal y la descongestión de las principales vías de acceso.
- (ii) Subsidios estatales a empresas y personas naturales, comprometidas con la transición a energías limpias.
- (iii) Avance tecnológico para futuras investigaciones y desarrollo de técnicas de evaluación multicriterio, aplicado a cualquier otro tema que competa.

La investigación ofrece un aporte significativo en la construcción de una sociedad que inevitablemente debe transitar hacia una nueva era de producción y

generación a nivel industrial, rigiéndose bajo acuerdos pactados en pro de la conservación del planeta tierra y todos los seres que en él habitan.

En la actualidad las máquinas térmicas y, en especial, los motores de combustión interna, a pesar de los problemas asociados (dependencia del petróleo, contaminación del aire, aumento de los niveles de CO<sub>2</sub>) son muy importantes para el desarrollo de los procesos térmicos y termodinámicos. En términos específicos, la UAN en la sede Puerto Colombia cuenta con el motor de combustión interna del laboratorio de experimentos, el cual se encuentra operativo y fue utilizado como banco de prueba para la realización de los experimentos. El motor de combustión cuenta con un tanque de 2 litros para el almacenamiento de combustible y, a su vez, cuenta con una balanza de 15 kg para la medición del consumo de combustible.

Para la calibración del sistema gravímetro del consumo de combustible, es decir, para la calibración de la balanza, la OIML (Organización Internacional de Metrología Legal) propone un único método de ejecución para procesos de calibración para las pruebas de exactitud y respetabilidad: Carga ascendente y descendente sin retorno a cero, mientras que, la Guía SIM plantea que cuatro posibles procesos de calibración pueden ser ejecutados para las mismas pruebas (dentro de los cuales se adopta el método propuesto por la OIML, i.e.: Carga ascendente y descendente sin retorno a cero), dichos procesos son:

- Carga ascendente y descendente con retorno a cero;
- Carga ascendente y descendente sin retorno a cero;
- Carga ascendente;
- Carga descendente.

En ese sentido, dentro de esta investigación y con el apoyo del uso de masas patrón debidamente certificadas, el estudio experimental fue realizado, con el fin de garantizar: (i) calibración certificada de la instrumentación; (ii) trazabilidad metrológica de los resultados.

Una vez obtenidos los datos en laboratorio, se realizó la tarea de tabular, calcular y a continuación, comparar por medio de herramientas estadísticas, las semejanzas, ventajas y desventajas entre los cuatro distintos procesos de

calibración. Comparando los resultados obtenidos para las distintas pruebas realizadas.

## **1.1 Formulación del problema**

Este TIG fue motivado, principalmente, por los desafíos que hoy en día representa para el sector transporte el uso de distintos combustibles en los motores de combustión interna. Sin bien es cierto, la tendencia busca utilizar combustibles que provengan de energía limpias, la dependencia del petróleo y sus derivados aún es muy fuerte. Específicamente, para el mercado colombiano, dos son los tipos de combustibles más utilizados en los motores de combustión interna, estos son: gasolina corriente y gasolina extra. La principal diferencia entre ambos tipos de combustible es el octanaje, parámetro que mide el índice de detonación del combustible. La gasolina extra, además de ser más limpia, resiste una temperatura mayor y una presión más elevada durante el proceso de la combustión cuando comparado con la gasolina corriente. En este sentido, ¿Cuál es el rendimiento térmico de un motor de combustión interna al utilizar estos dos tipos de combustible utilizando métodos multicriterio de apoyo a la decisión? Esta es la principal pregunta que buscó responder este proyecto de grado aquí documento.

En ese orden de ideas, a partir del uso de estas técnicas multicriterio es posible: (i) conocer cada parte que conforma un motor de combustión interna; (ii) conocer el desempeño térmico del motor de combustión interna a partir de dos tipos de combustible; (iii) conocer, desde el punto de vista económico, el desempeño del motor de combustión interna a partir de métodos multicriterio.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo general**

Realizar un análisis térmico-económico de un motor de combustión interna a partir del uso de dos distintos combustibles disponibles comercialmente en el sector del transporte colombiano.

## 1.2.2 Objetivos específicos

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

- Estimar la incertidumbre asociada a la medición asociada al consumo específico de combustible. Esto con el fin de evaluar la confiabilidad metrológica asociada al rendimiento del motor de combustión interna.
- Evaluar, en función de dos tipos distintos de combustible, los parámetros que caracterizan el desempeño termodinámico del motor de combustión interna (RPM, consumo específico de combustible, calor de entrada y salida, eficiencia térmica), así como obtener las curvas características en condiciones reales de operación.
- Realizar un análisis económico en cuanto a la factibilidad del uso de los dos combustibles utilizados para la operación del motor de combustión interna, utilizando en el método multicriterio Fuzzy-AHP (*Analytic Hierarchy Process*).

## 1.3 Justificación

El proyecto es altamente relevante teniendo en vista que propone desarrollar técnicas estadísticas para el análisis de incertidumbre y desempeño metrológico en equipos industriales. El estudio propuesto puede ser aplicado a diversos equipos del sector industrial –que envuelvan el proceso de transferencia de calor– y, en términos específicos, esta investigación cuenta con datos experimentales que serán obtenidos en el Laboratorio de Experimentos de la UAN Sede Puerto Colombia, utilizando para esto el motor de combustión interna. Vale la pena resaltar que este proyecto de grado hace parte de uno de los productos asociados al proyecto de investigación aprobado por la Vicerrectoría de Ciencia, Tecnología e Innovación de la Universidad Antonio Nariño. El proyecto No 2022008 titulado: “Desarrollo de técnicas estadísticas para el análisis de incertidumbre y desempeño metrológico en equipos industriales”, cuya cooperación internacional se ve representada por datos disponibilizados por el Programa de *Pósgraduação em Metrologia, Qualidade e Inovação da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro* (Brasil), que oficia como institución internacional co-investigadora del presente proyecto.

Los resultados del proyecto serán de especial interés para el sector industrial nacional e internacional, una vez que: (i) se explora un análisis de consistencia,

evaluando parámetros de ingeniería térmica, los cuales impactan en la eficiencia de un motor de combustión interna. En este sentido, un incuestionable impacto económico es generado, debido a que un aumento de efectividad repercute en disminución de costos de operación, consumo de energía y mantenimiento; (ii) se desarrolla un complejo análisis de incertidumbre basado en el suplemento 1 de la ISO GUM, lo cual permitirá evaluar metrológicamente el fenómeno físico asociado a la operación de un motor de combustión interna. Esto permitirá un análisis robusto con el fin de proponer estrategias que permitan la mejora del desempeño técnico e hidrodinámico de un motor de combustión interna en condiciones reales de operación. Finalmente, la aplicación de nuevas técnicas de mantenimiento en el sector industrial, así como, garantizar la confiabilidad metrológica de los resultados a partir del desarrollo de complejos algoritmos de incertidumbre de medición, posibilitan que la metodología propuesta sea aplicada en el sector industrial colombiano con resultados que, se visualizan, altamente satisfactorios para el crecimiento y desarrollo tecnológico del País.

## 1.4 Diseño metodológico

A seguir se describe la metodología:

*Objetivo específico #1: Estimar la incertidumbre asociada la medición asociada al consumo específico de combustible. Esto con el fin de evaluar la confiabilidad metrológica asociada al rendimiento del motor de combustión interna.*

En esta etapa se realizará la calibración de una báscula de 30 kg utilizada para medir la masa del combustible que es transferida hacia el motor. Vale la pena resaltar que los sensores de temperatura cuentan con una calibración previa vigente y la incertidumbre asociada a la medición de temperatura ya es conocida. En este caso, la calibración de la balanza fue realizada utilizando los métodos que recomienda la Guía SIM (Sistema Interamericano de Metrología) de 2009.

*Objetivo específico #2: Evaluar, en función de dos tipos distintos de combustible, los parámetros que caracterizan el desempeño termodinámico del motor de combustión interna (RPM, torque, potencia, relación aire-combustible, flujo másico*

---

de aire, consumo específico de combustible, eficiencia térmica), así como obtener las curvas características en condiciones reales de operación.

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

En esta etapa se procederá a determinar los parámetros asociados al motor de combustión interna. A seguir se citan algunos de los parámetros que serán determinados: RPM, torque, potencia, relación aire-combustible, flujo másico de aire, consumo específico de combustible, eficiencia térmica, consumo de energía, entre otros. Adicionalmente, estos parámetros serán analizados para cada tipo de combustible que será utilizado. Finalmente, las curvas características de operación tales como RPM vs Consumo de combustible, Potencia Vs RPM, entre otras, serán obtenidas en condiciones reales de operación.

*Objetivo específico #3: Realizar un análisis económico en cuanto a la factibilidad del uso de los dos combustibles utilizados para la operación del motor de combustión interna, utilizando en el método multicriterio AHP (Analytic Hierarchy Process).*

- *Etapa 4: Evaluación económica del proceso*

En esta última etapa del proyecto se espera realizar un análisis económico del rendimiento del motor. Para esto se tendrán en cuenta diversos factores que pueden incidir en el proceso. Diversos criterios serán utilizados para el análisis del proceso: costo de combustible, costo de operación, costo de mantenimiento, comercialización y disponibilidad del combustible, entre otros factores. Un análisis multicriterio basado en la metodología AHP (*Analytic Hierarchy Process*) será particularmente útil en este proceso.

## **2. Contexto energético a nivel nacional e internacional del sector transporte**

En la actualidad existen diferentes avances tecnológicos que son prueba de que se puede lograr una eficiencia energética a nivel mundial, ejemplo de ello son vehículos capaces de funcionar con una demanda de combustible menor, electrodomésticos que consumen menos energía eléctrica, y sistemas de iluminación con un consumo energético hasta cuatro veces menor que los antiguas. Los programas de eficiencia energética han tomado gran relevancia debido a que se conoce que solo el 37% de la energía primaria disponible, se convierte en energía útil (Colin, 2015). En el paso por las distintas fases de procesos de transformación, los energéticos pierden cerca del 63% de su capacidad potencial, antes de prestar el servicio final (Poveda, 2007).

La principal relevancia de la eficiencia energética está dada en establecer un equilibrio en función del servicio requerido y el potencial de energía que este preste. En otras palabras, el propósito de la eficiencia energética es reducir al máximo las pérdidas del sistema, implementando nuevas tecnologías (Weizsacker et al., 1997).

Actualmente en el sector energético a nivel mundial se enfrenta a tres grandes desafíos, *i.e.*: la reducción del consumo energético, el cambio climático y la seguridad de suministros. Entre las diversas soluciones que se han estudiado para resolver estos gigantescos retos, la eficiencia energética, así como el ahorro de energía han estado constantemente sobre la mesa, por ser las alternativas menos costosas en aplicar, debido a que: (i) ahorra recursos y (ii) logra reducir significativamente las emisiones de gases de efecto invernadero en un 43% durante los siguientes años (Carretero & García, 2012).

La intensidad energética mundial disminuyó un 1,8% en el 2016. Este descenso se produjo debido a las nuevas tendencias tecnológicas que se han venido implementando para eficientización de los procesos, pese a que no fue inferior al de 2015, se produjo un aumento significativo en comparación con las décadas anteriores (Figura 1). Sin embargo, la demanda energética varía según la región. En el país asiático China, la demanda energética descendió un 5,2%, lo que evidencia un alto crecimiento económico con un pequeño incremento en la demanda de energía. Este país asiático tiene un alto impacto en el consumo energético mundial, sin este país, el consumo energético mundial en el 2016 solo hubiese sido de un 1,1%.

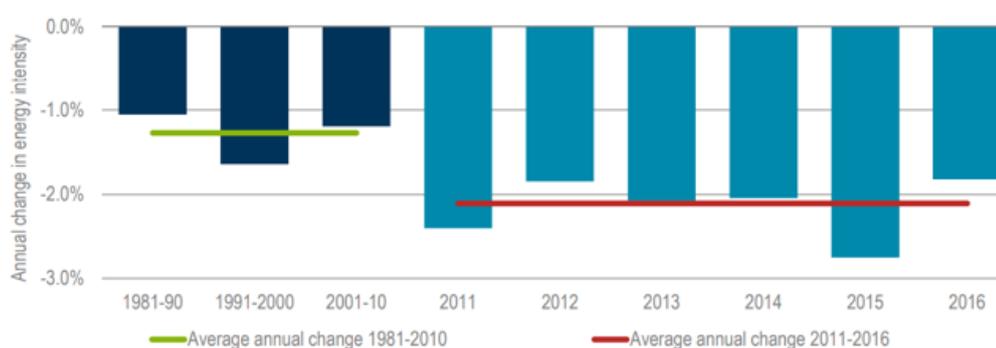


Figura 1. Cambios anuales en la intensidad global de energía primaria

Fuente: International Energy Agency

La intensidad energética mejoró un 2,9% en los Estados Unidos y un 1,3% en la Unión Europea. La caída de la intensidad energética fue menos marcada en otras partes del mundo. La intensidad energética final -medida como el consumo total de energía final por unidad de PIB mundial, en 2016 USD sobre la base de una PPA- ha seguido una tendencia similar a la de la intensidad energética primaria. En 2016, la intensidad energética final descendió un 1,5%. Esta tasa de mejora fue inferior a la de 2014 y 2015, pero similar a la de la intensidad de la energía primaria. La tasa media de mejora desde 2011 (1,9%) es superior a la de las décadas anteriores (1,6%). El transporte era responsable del 28% del consumo mundial de energía final en 2016 (IEA, 2017). Más del 90% del uso de la energía en el transporte depende de los productos petrolíferos, lo que significa que la eficiencia en las mejoras puede reducir significativamente las emisiones de contaminantes y gases de efecto invernadero. Vehículos ligeros (LDVs, buses, camiones y vehículos comerciales ligeros) han atraído la atención de la población

y de los responsables de las normas políticas en el medio de transporte, mientras que otros modos de transporte se están quedando rezagados. A partir de 2016 sólo cuatro los países tenían normas de economía de combustible para vehículos pesados (HDV). El mercado de LDV está experimentando una tendencia divergente. Venta de vehículos muy eficientes como los vehículos eléctricos a batería (BEVs) de combustible (SUVs, furgonetas y camionetas) también están ganando popularidad (IEA, 2017). Cinco países, Canadá, la República Popular China, India, Japón y los Estados Unidos- han adoptado normas de eficiencia en el consumo de combustible de los vehículos pesados (HDV), que representan alrededor del 40% del consumo total de combustible para el transporte por carretera. Estas normas cubrían casi el 50% de las ventas mundiales de HDV en 2017. La Unión Europea ha propuesto una norma de emisión de CO2 para los HDV, que permitirá aumentar la eficiencia (EEM, 2018). En el contexto nacional, se clasifican las características de consumo de energía por sectores: el industrial, el comercial público y de servicios, el residencial y el transporte. Según el balance energético colombiano (BECO), el sector transporte del país consume cerca del 40% de la energía total, seguido del sector industrial con un 30%, dentro de este 30% cabe resaltar la relevancia que tiene en el área térmica y similares, como es el gas natural, el bagazo y el carbón mineral, los cuales figuran con el 83% del total de la energía que es consumida por el sector industrial y el 17% restante representan el uso de la energía eléctrica, como se representa en la Figura 2 (MME, 2017).

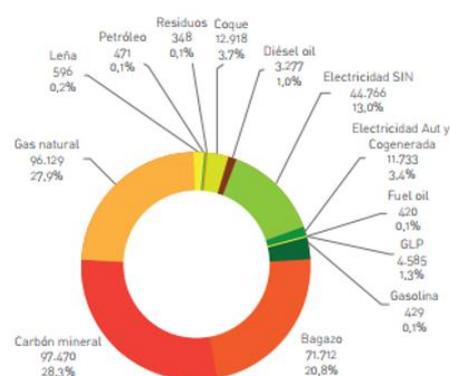


Figura 2. Intervención en el gasto de energía en sector industrial

Fuente: Plan de acción indicativo de eficiencia energética 2017 -2022 UPME

El sector comercial, público y de servicio tan solo representa el 7% del consumo final del país, siendo la electricidad, el gas natural y el GLP, los principales

energéticos de este sector, según la unidad de planeación minero-energética del país.

El uso esencial de la electricidad es la iluminación (31%), aire acondicionado (22,8%) y la refrigeración (13,9%). El empleo del gas natural en este sector se puede asociar a la aplicación de calor directo e indirecto como lo es el cocimiento de alimento, potabilización de agua y acondicionamiento de aire en piscinas, baños turcos, saunas, etc.; en el primer caso; y de zonas de lavandería en centros de salud, centros de recreación y sector hotelero; esterilización de espacios concurridos, en el segundo caso (MME, 2017). En el sector residencial el consumo está relacionado directamente con el uso de la electricidad para refrigeración e iluminación y el uso del gas natural en la preparación de alimentos. Estos energéticos tienen una participación de un 55% para el uso eléctrico y un 35% para el gas natural. El sector transporte es muy amplio, siendo un enorme consumidor energético en todo mundo. Se proyecta que este sector represente el 97% del aumento del uso del petróleo entre el 2013 y 2030, este aumento en términos de seguridad energética y medio ambiente representa una dependencia al petróleo y un aumento considerable en las emisiones de gases invernadero, es por esto que una de las prioridades energéticas de los países es estudiar alternativas energéticas con el fin de no reducir al máximo esta dependencia al petróleo. En diversos países, el sector transporte figura como el mayor consumidor de energía, tanto así que para la década de los noventa el consumo energético en países latinoamericanos este sector se duplicó, debido al aumento considerable de la flota vehicular. Este importante aumento significó gran reto de movilidad y de cuidado del medio ambiente en las principales capitales de los países latinoamericanos (Kreuzer & Wilmsmeier, 2014). En Colombia, el sector transporte es el principal consumidor de energía debido a que pierde unos 3,000 millones de dólares debido a la baja eficiencia y tecnología con la que cuentan estos. Realizar una comparación con naciones similares resulta difícil, ya que Colombia presenta una geografía muy variada (MME, 2017). Según UPME el consumo en el sector transporte para el año 2015 fue de 496,512 TJ siendo los derivados del petróleo los principales energéticos usados, el ACPM con el 37% y la gasolina con el 40% y por último con una pobre participación la electricidad con 1%. Complementariamente, Colombia cuenta con un programa de biocombustible el cual no cuenta con un alto porcentaje. Por otra parte, se obtuvo la siguiente distribución de consumo, el 88% del ACPM es usado en vehículos de transporte

público y el acarreo de carga, a la vez que el 83% de la gasolina es usado por vehículos privados de pasajeros.

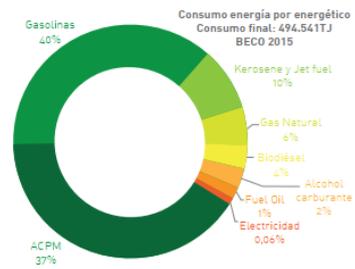


Figura 3. Distribución del consumo por energético en el sector transporte - 2015

Fuente: Plan de acción indicativo de eficiencia energética 2017 -2022 UPME

### **3. Fundamentos de los métodos multicriterio para la toma de decisión**

Los métodos multicriterios de apoyo a la decisión (MMAD) consisten en un conjunto de procedimientos lógicos destinados a construir modelos con el objetivo de guiar al tomador de decisiones (Ren et al., 2017), en la elección de alternativas. La toma de decisiones multicriterio se considera una metodología altamente confiable para clasificar múltiples alternativas basadas en varios criterios (Umm et al., 2009). Los MMAD se han aplicado con éxito en diferentes áreas de economía, energía, gestión, transporte, gestión de recursos humanos y otros dominios (Shih et al., 2007; Velásquez y Hester, 2013).

El comienzo de los métodos multicriterios estructurados data de la Segunda Guerra Mundial, surgiendo de la necesidad de estructurar matemáticamente los problemas logísticos enfrentados en esta guerra (Pitteri, 2016). Durante las décadas de 1960 y 1970, se desarrollaron las primeras metodologías estructuradas, destacando Bernard Roy en Francia, con el método ELECTRE, que se convertiría en una familia de métodos, Thomas L. Saaty en los Estados Unidos, con el método AHP y Keeney y Raiffa, con MAUT, también en los Estados Unidos (Fernandes et al., 2009).

Una corriente reciente de pensamiento para abordar los problemas de decisión es la Ayuda de Decisión Multicriterio (AMD). Este enfoque se caracteriza por el análisis de problemas a la luz de varios criterios en conflicto y el reconocimiento de la subjetividad inherente a los tomadores de decisiones (Costa, 2006). AMD es un método que busca modelar la solución de problemas de toma de decisiones, más específicamente, la elección de alternativas. Este método consiste en una

herramienta poderosa y se usa cada vez más en la toma de decisiones en el entorno organizacional e institucional. El uso de AMD implica la comprensión de que no existe la mejor alternativa para todos los criterios, por lo tanto, el objetivo es ayudar al proceso de toma de decisiones. Basado en la estructura del modelo elegido, se realiza un análisis de sensibilidad para evaluar la volatilidad de las alternativas. Por lo tanto, esta metodología no busca la solución óptima, sino una solución de compromiso, en la que debe prevalecer el consenso entre las partes involucradas (Gomes y Gomes, 2012).

Según Moraes (1999) para el análisis de los problemas de toma de decisiones, es importante conocer algunas terminologías utilizadas con frecuencia durante el proceso:

- **Tomador de decisiones:** se utiliza para referirse al individuo o grupo de individuos que intervienen en el proceso, influyendo directa o indirectamente en la decisión, a través de la manifestación de preferencias y juicios de valor proporcionados en diferentes etapas del proceso.
- **Analista:** se refiere al científico o técnico, cuyo papel fundamental es ayudar al tomador de decisiones en el proceso. Ayuda al tomador de decisiones a expresar sus preferencias, a sacar conclusiones definitivas sobre el conjunto de acciones (alternativas viables).
- **Facilitador:** es un líder experimentado, que debe centrar su atención en resolver el problema, coordinar los puntos de vista del tomador de decisiones, mantenerlo motivado y destacar el aprendizaje en el proceso de toma de decisiones. Su función fundamental es aclarar y modelar el proceso de evaluación o negociación consistente con la toma de decisiones. Uno debe permanecer neutral durante el proceso de toma de decisiones, para no influir en los juicios de los tomadores de decisiones.
- **Objetivo:** representa la definición del problema, que puede ser de elección, clasificación, orden o descripción.
- **Atributo:** es una medida que proporciona una base para evaluar los niveles de varios objetivos y definir si las metas se han alcanzado o no con una decisión particular, es decir, los atributos funcionan como un aspecto medible del juicio, por el cual una variable de La decisión puede ser caracterizada. También se denominan criterios y subcriterios.

- **Alternativas:** estas son las opciones para la toma de decisiones, también llamadas acciones potenciales.

En términos generales, los MMAD puede definirse como un conjunto de técnicas desarrolladas para ayudar a un tomador de decisiones (ya sea que se caracterice por una persona, grupo político, grupo de técnicos, entre otros) a tomar una decisión relacionada con un problema complejo, difícil de resolver y con varias soluciones alternativas, de acuerdo con ciertos criterios. Además, los instrumentos deben tener la capacidad de abordar problemas posiblemente complejos de una manera simple, de modo que sean accesibles para los tomadores de decisiones, sin que tengan que invertir mucho tiempo y dinero para usarlos (Costa, 2006).

La Tabla 1 presenta el MMAD principal, incluidas las referencias bibliográficas, así como las ventajas y desventajas de la aplicación.

**Tabla 1** – Métodos multicriterio de apoyo a la decisión

MMAD	Ventajas	Desventajas
<i>Analytical Hierarchy Process – AHP</i> (Saaty, 1977; 1990; 1991; 2000)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Modelo simple para construir;</li> <li>- proceso lógico;</li> <li>- Eficiente en el manejo de atributos cualitativo y cuantitativo;</li> <li>- Resultados que son fáciles de entender.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Se han planteado dudas sobre el razonamiento de esa teoría. Hay una fuerte visión de que los axiomas en los que se encuentra el AHP las bases no son lo suficientemente claro ser empíricamente probado</li> </ul>
<i>Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution – TOPSIS</i> (Hwang e Yoon, 1981)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Consistencia interna y solidez lógica;</li> <li>- Fácil de seguir;</li> <li>- Intuitivamente atractivo;</li> <li>- No hay cálculos complicados;</li> <li>- Fácilmente configurado en MS Excel;</li> <li>- Los resultados son fáciles comprensión;</li> <li>- Valor de índice simple dado;</li> <li>- Los resultados pueden ser fácilmente demostrado gráficamente</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Gran número de procedimientos;</li> <li>- Gran cantidad de cálculos;</li> <li>- Proporciona un resultado general.</li> </ul>
<i>Preference Ranking Method for Enrichment Evaluation – PROMETHEE</i> (Brans e Vincke, 1984)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fomenta una mayor interacción entre tomador de decisiones y el modelo en busca del bien opciones;</li> <li>- Los defensores argumentan que su el concepto de superación es más relevante para situaciones prácticas que el concepto de dominación restrictiva.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Se necesita mucho conocimiento.</li> </ul>
<i>Fuzzy Decision Approach – FDA</i> (Liang e Wang, 1994)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Se basa en palabras y no en números, expresados lingüísticamente;</li> <li>- Manejo mejorado de imprecisiones;</li> <li>- Facilidad de especificación de reglas;</li> <li>- El uso de variables lingüísticas deja más cerca del pensamiento humano;</li> <li>- Requiere pocas reglas, pocos valores y pocas decisiones.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Construcción compleja;</li> <li>- La lógica difusa es bastante impreciso;</li> <li>- Dificultad para predecir lo que será interacción entre los diferentes Factores condicionantes del problema.</li> </ul>

## 4. Resultados y discusión

Este capítulo describe, de forma amplia, los principales resultados obtenidos en la investigación aquí documentada.

### 4.1 Cálculo de la incertidumbre asociada al consumo específico de combustible

La Figura 4 ilustra el procedimiento de calibración realizado a la Balanza Trumax de 15kg ubicada en el laboratorio.



Figura 4. Balanza Trumax para le medición del consumo específico de combustible

La Tabla 2 ilustra los parámetros utilizados para el cálculo de la incertidumbre asociada a la balanza Trumax que se encuentra en el laboratorio de experimentos

de la Universidad Antonio Nariño y es utilizada para la medición del consumo específico de combustible en el motor de combustión.

**Tabla 2** – Factores utilizados para la calibración

Parámetro	Símbolo	Local de fabricación / Local de calibración	Valor numérico	Unidad
Aceleración de gravedad de referencia	$g_{ref}$	Medellín (Colombia)	9,776180195	m/s <sup>2</sup>
Aceleración de gravedad del local de calibración	$g_{Baq}$	Puerto Colombia (Colombia)	9,828620367	m/s <sup>2</sup>
Relación de aceleración de gravedad	$g_{Baq} / g_{ref}$	-	1,005364076	-
Masa específica del objeto	$\rho_{masa}$	-	8000	kg/m <sup>3</sup>
Masa específica del aire	$\rho_{ar}$	-	1,180712744	kg/m <sup>3</sup>
Factor de empuje	$1 - \rho_{ar} / \rho_{masa}$	-	0,999852411	-

Las tablas seguir presentan los datos experimentales de la calibración para las cargas ascendente y descendente:

**Tabla 3** – Datos experimentales (carga ascendente y descendente)

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	27.7	1021.7
2	1	0.997	27.7	1021.7	2	1	0.997	27.7	1021.7
3	0	0.001	27.7	1021.7	3	0	0.001	27.7	1021.7
4	3	2.993	27.7	1021.7	4	3	2.993	27.7	1021.7
5	0	0.001	27.7	1021.7	5	0	0.001	27.7	1021.7
6	5	4.998	27.7	1021.7	6	5	4.998	27.7	1021.7
7	0	0.001	27.7	1021.7	7	0	0.001	27.7	1021.7
8	7	6.977	27.7	1021.7	8	7	6.977	27.7	1021.7
9	0	0.001	27.7	1021.7	9	0	0.001	27.7	1021.7
10	9	8.964	27.7	1021.7	10	9	8.964	27.7	1021.7
11	0	0.001	27.7	1021.7	11	0	0.001	27.7	1021.7
12	10	9.996	27.7	1021.7	12	10	9.996	27.7	1021.7
13	0	0.001	27.7	1021.7	13	0	0.001	27.7	1021.7
14	12	11.992	27.7	1021.7	14	12	11.992	27.7	1021.7
15	0	0.001	27.7	1021.7	15	0	0.001	27.7	1021.7
16	13	12.994	27.7	1021.7	16	13	12.994	27.7	1021.7
17	0	0.001	27.7	1021.7	17	0	0.001	27.7	1021.7
18	14	13.989	27.6	1021.7	18	14	13.989	27.6	1021.7
19	0	0.001	27.6	1021.7	19	0	0.001	27.6	1021.7
20	15	14.987	27.5	1021.7	20	15	14.987	27.5	1021.7
21	0	0.001	27.5	1021.7	21	0	0.001	27.5	1021.7

La Tabla 4 presenta la combinación de las distintas masas patrón utilizadas en el proceso de calibración. Por su parte, la Tabla 5 presenta la incertidumbre de medición asociada a la calibración de cada masa patrón, así como el respectivo error de medición reportado en el certificado de calibración:

**Tabla 4 – Masas patrón para el proceso de calibración**

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)

**Tabla 5 – Incertidumbre de medición de las masas patrón**

No	Valor nominal	Identificación patrón	Error kg	Incertidumbre Expandida (U)	Factor k	Incertidumbre (u)
6	1.0	1 kg (F1)	0.00000059	0.0000017	2.0	0.00000085
7	2.0	2 kg (F1)	0.00000306	0.0000033	2.0	0.0000017
8	2.0	2 kg (F1)	0.00000306	0.0000033	2.0	0.0000017
9	5.0	5 kg (F1)	0.00000330	0.0000083	2.0	0.0000042
10	10.0	10 kg (F1)	0.00002200	0.0000170	2.0	0.0000085
11	20.0	Masa patrón 20 kg (M1)	0.000064	0.000033	2.0	0.000017

Aplicando las ecuaciones descritas consolidadas para el cálculo de incertidumbre – Fundamentos del cálculo de la incertidumbre de medición– fue posible obtener los resultados de la calibración en la balanza Trumax. Estos resultados fueron obtenidos tanto para la carga ascendente como para la situación donde es evaluada la carga descendente. Vale la pena resaltar que este procedimiento es realizado con el fin de evaluar el desempeño metrológico de la balanza durante el proceso de pérdida y/o consumo de combustible en el motor de combustión. Así mismo, se busca conocer los errores y las incertidumbres asociadas al proceso de inyección de combustible al tanque. Es decir, como la balanza responde a esos procesos de cargue y descargue. Las Tablas a seguir consolidan los resultados encontrados durante el proceso experimental

Tabla 6 – Resultados de la calibración para la carga ascendente

Carga Ascendente												
Puntos	Patrón		Balanza				Temperatura ambiente		Presión atmosférica		Masa específica del aire	
	Masa nominal	Incertidumbre (u)	Masa indicada	Masa aparente	Incertidumbre masa aparente	Indicado - aparente	Indicada	Incertidumbre	Indicación barómetro	Incertidumbre	Indicado	Incertidumbre
	kg	kg	kg	kg	kg	kg	°C	°C	mbar/abs	mbar/abs	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>
1	0	0.00000	0.001	0.001	0.000000	0.000	27.7	0.25	1021.7	0.058	1.183	0.0010
2	1	0.00000186	0.997	1.002	0.0000019	-0.005	27.7	0.25	1021.7	0.058	1.183	0.0010
3	0	0.00000000	0.001	0.001	0.0000000	0.000	27.7	0.25	1021.7	0.058	1.183	0.0010
4	3	0.0000042	2.993	3.009	0.0000043	-0.016	27.7	0.25	1021.7	0.058	1.183	0.0010
5	0	0.00000000	0.001	0.001	0.0000000	0.000	27.7	0.25	1021.7	0.058	1.183	0.0010
6	5	0.0000048	4.998	5.024	0.0000048	-0.026	27.7	0.25	1021.7	0.058	1.183	0.0010
7	0	0.00000000	0.001	0.001	0.0000000	0.000	27.7	0.25	1021.7	0.058	1.183	0.0010
8	7	0.0000087	6.977	7.013	0.0000087	-0.036	27.7	0.25	1021.7	0.058	1.183	0.0010
9	0	0.00000000	0.001	0.001	0.0000000	0.000	27.7	0.25	1021.7	0.058	1.183	0.0010
10	9	0.0000095	8.964	9.011	0.0000095	-0.047	27.7	0.25	1021.7	0.058	1.183	0.0010
11	0	0.00000000	0.001	0.001	0.0000000	0.000	27.7	0.25	1021.7	0.058	1.183	0.0010
12	10	0.0000096	9.996	10.048	0.0000098	-0.052	27.7	0.25	1021.7	0.058	1.183	0.0010
13	0	0.00000000	0.001	0.001	0.0000000	0.000	27.7	0.25	1021.7	0.058	1.183	0.0010
14	12	0.00001652	11.992	12.055	0.0000167	-0.063	27.7	0.25	1021.7	0.058	1.183	0.0010
15	0	0.00000000	0.001	0.001	0.0000000	0.000	27.7	0.25	1021.7	0.058	1.183	0.0010
16	13	0.00001666	12.994	13.062	0.0000168	-0.068	27.7	0.25	1021.7	0.058	1.183	0.0010
17	0	0.00000000	0.001	0.001	0.0000000	0.000	27.7	0.25	1021.7	0.058	1.183	0.0010
18	14	0.00001709	13.989	14.062	0.000017	-0.073	27.6	0.25	1021.7	0.058	1.184	0.0010
19	0	0.00000000	0.001	0.001	0.0000000	0.000	27.6	0.25	1021.7	0.058	1.184	0.0010
20	15	0.00001856	14.987	15.065	0.000019	-0.078	27.5	0.25	1021.7	0.058	1.184	0.0010
21	0	0.00000000	0.001	0.001	0.0000000	0.000	27.5	0.25	1021.7	0.058	1.184	0.0010

**Tabla 7 – Resultados de la calibración para la carga ascendente**

Carga Descendente												
Puntos	Patrón		Balanza				Temperatura ambiente		Presión atmosférica		Masa específica del aire	
	Masa nominal	Incertidumbre (u)	Masa indicada	Masa aparente	Incertidumbre masa aparente	Indicado - aparente	Indicada	Incertidumbre	Indicación barómetro	Incertidumbre	Indicado	Incertidumbre
	kg	kg	kg	kg	kg	kg	°C	°C	mbar/abs	mbar/abs	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>
1	0	0.00000	0.000	0.000	0.000000	0.000	27.7	0.25	1021.7	0.058	1.183	0.0010
2	1	0.0000186	1.000	1.005	0.000019	-0.005	27.7	0.25	1021.7	0.058	1.183	0.0010
3	0	0.0000000	0.000	0.000	0.0000000	0.000	27.7	0.25	1021.7	0.058	1.183	0.0010
4	3	0.0000042	3.000	3.016	0.0000043	-0.016	27.7	0.25	1021.7	0.058	1.183	0.0010
5	0	0.0000000	0.000	0.000	0.0000000	0.000	27.7	0.25	1021.7	0.058	1.183	0.0010
6	5	0.0000048	5.000	5.026	0.0000048	-0.026	27.7	0.25	1021.7	0.058	1.183	0.0010
7	0	0.0000000	0.000	0.000	0.0000000	0.000	27.7	0.25	1021.7	0.058	1.183	0.0010
8	7	0.0000087	7.000	7.037	0.0000087	-0.037	27.7	0.25	1021.7	0.058	1.183	0.0010
9	0	0.0000000	0.000	0.000	0.0000000	0.000	27.7	0.25	1021.7	0.058	1.183	0.0010
10	9	0.0000095	9.000	9.047	0.0000096	-0.047	27.7	0.25	1021.7	0.058	1.183	0.0010
11	0	0.0000000	0.000	0.000	0.0000000	0.000	27.7	0.25	1021.7	0.058	1.183	0.0010
12	10	0.0000096	10.000	10.052	0.0000098	-0.052	27.7	0.25	1021.7	0.058	1.183	0.0010
13	0	0.0000000	0.000	0.000	0.0000000	0.000	27.7	0.25	1021.7	0.058	1.183	0.0010
14	12	0.0000165	12.000	12.063	0.0000167	-0.063	27.7	0.25	1021.7	0.058	1.183	0.0010
15	0	0.0000000	0.000	0.000	0.0000000	0.000	27.7	0.25	1021.7	0.058	1.183	0.0010
16	13	0.0000167	13.000	13.068	0.0000168	-0.068	27.7	0.25	1021.7	0.058	1.183	0.0010
17	0	0.0000000	0.000	0.000	0.0000000	0.000	27.7	0.25	1021.7	0.058	1.183	0.0010
18	14	0.000017	14.000	14.073	0.000017	-0.073	27.6	0.25	1021.7	0.058	1.184	0.0010
19	0	0.0000000	0.000	0.000	0.0000000	0.000	27.6	0.25	1021.7	0.058	1.184	0.0010
20	15	0.000019	15.000	15.078	0.000019	-0.078	27.5	0.25	1021.7	0.058	1.184	0.0010
21	0	0.0000000	0.000	0.000	0.0000000	0.000	27.5	0.25	1021.7	0.058	1.184	0.0010

El Apéndice A consolida los resultados del cálculo del error medio cuadrático para cada uno de los polinomios evaluados. Fueron evaluados tres polinomios y, calculando la incertidumbre del ajuste, se pudo determinar el polinomio que mejor representa la naturaleza física del problema.

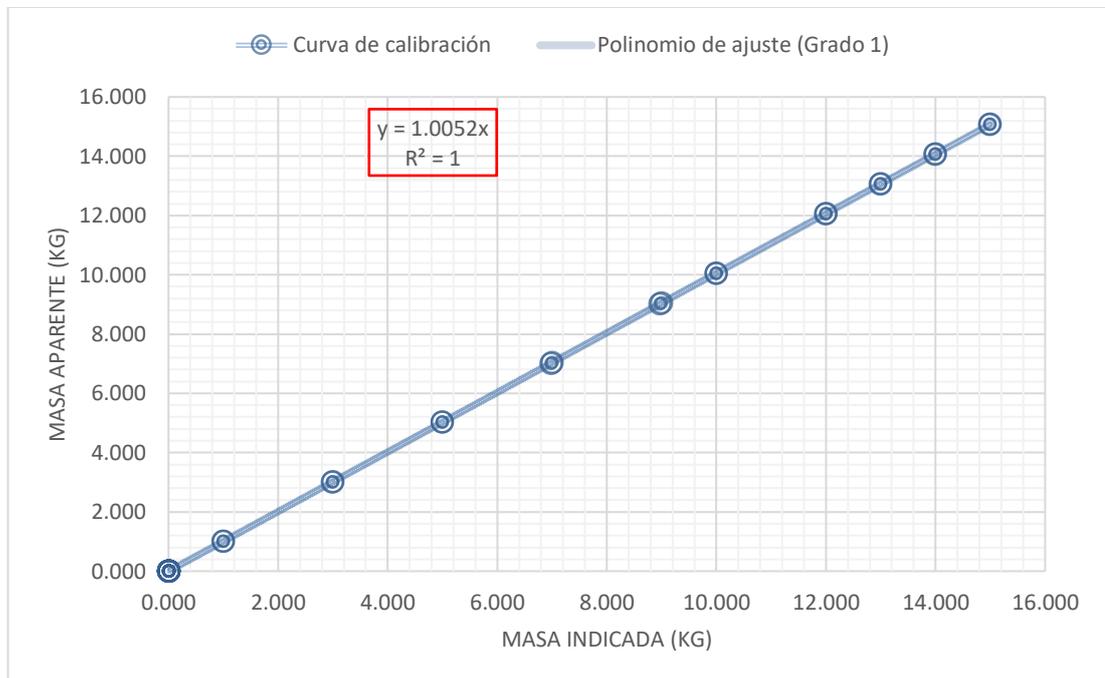


Figura 5. Polinomio de primer grado

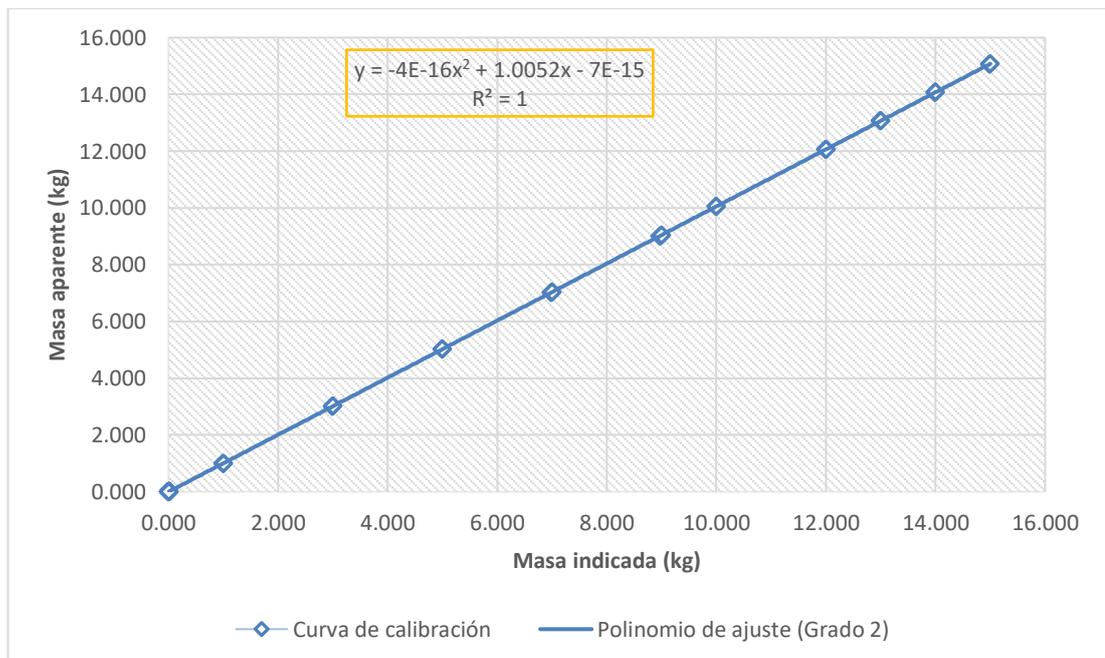


Figura 6. Polinomio de segundo grado

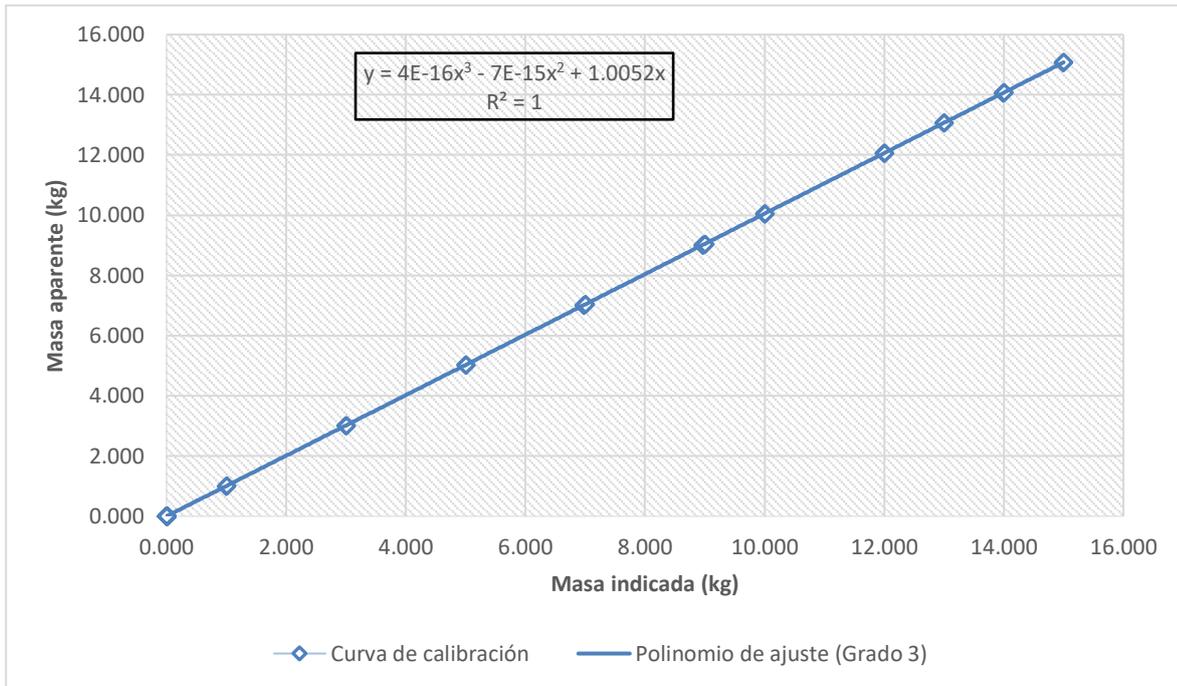


Figura 7. Polinomio de tercer grado

La Tabla 8 ilustra el resultado para la incertidumbre de ajuste calculada para cada polinomio evaluado

**Tabla 8** – Resultado del cálculo de la incertidumbre del ajuste

Incertidumbre de ajuste (kg)		
Grado 1	Grado 2	Grado 3
0.00011	0.00019	0.0377

El polinomio de primer grado es el que mejor modela la naturaleza física del problema conforme se pudo observar en la tabla anterior, una vez que corresponde al menor valor de la incertidumbre del ajuste. El polinomio sigue la fórmula :  $y = 1,0052x$

donde:

y: denota el valor de la masa ajustada (g);

x: denota el valor de masa indicada por la balanza (g).

La **Tabla 9** presenta los resultados finales de la balanza:

Tabla 9 – Resultado final de la calibración

	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	0.00011	0.00000	0.00058	0.0006	0.0012	0.0000
	2	0.997	1.002	0.00011	0.00000186	0.00058	0.0006	0.0012	-0.0052
	3	2.993	3.009	0.00011	0.0000042	0.00058	0.0006	0.0012	-0.0156
	4	4.998	5.024	0.00011	0.0000048	0.00058	0.0006	0.0012	-0.0260
	5	6.977	7.013	0.00011	0.0000087	0.00058	0.0006	0.0012	-0.0363
	6	8.964	9.047	0.00011	0.0000095	0.00058	0.0006	0.0012	-0.0828
	7	9.996	10.052	0.00011	0.0000096	0.00058	0.0006	0.0012	-0.0560
	8	11.992	12.062	0.00011	0.0000165	0.00058	0.0006	0.0012	-0.0704
	9	12.994	13.068	0.00011	0.0000167	0.00058	0.0006	0.0012	-0.0736
	10	13.989	14.073	0.00011	0.0000171	0.00058	0.0006	0.0012	-0.0838
	11	14.987	15.078	0.00011	0.0000186	0.00058	0.0006	0.0012	-0.0910
CARGA DESCENDENTE	12	0.000	0.000	0.00011	0.0000000	0.00058	0.0006	0.0012	-0.0001
	13	1.000	1.005	0.00011	0.0000019	0.00058	0.0006	0.0012	-0.0052
	14	3.000	3.016	0.00011	0.0000042	0.00058	0.0006	0.0012	-0.0156
	15	5.000	5.026	0.00011	0.0000048	0.00058	0.0006	0.0012	-0.0260
	16	7.000	7.036	0.00011	0.0000087	0.00058	0.0006	0.0012	-0.0364
	17	9.000	9.047	0.00011	0.0000095	0.00058	0.0006	0.0012	-0.0468
	18	10.000	10.052	0.00011	0.0000096	0.00058	0.0006	0.0012	-0.0520
	19	12.000	12.062	0.00011	0.0000165	0.00058	0.0006	0.0012	-0.0624
	20	13.000	13.068	0.00011	0.0000167	0.00058	0.0006	0.0012	-0.0676
	21	14.000	14.073	0.00011	0.0000171	0.00058	0.0006	0.0012	-0.0728
	22	15.000	15.078	0.00011	0.000019	0.00058	0.0006	0.0012	-0.0780



La incertidumbre asociada al consumo de combustible es igual a 0.0012 kg, es decir, 0.01% de la capacidad máxima de la balanza. En otras palabras, el consumo de combustible es medido con una incertidumbre igual a 0.01% del valor medido. Las figuras a seguir ilustran las curvas de calibración asociada para la carga ascendente y descendente de la balanza, las cuales se pueden asociar al cargue y descargue del consumo de combustible en el proceso de operación del motor de combustión interna

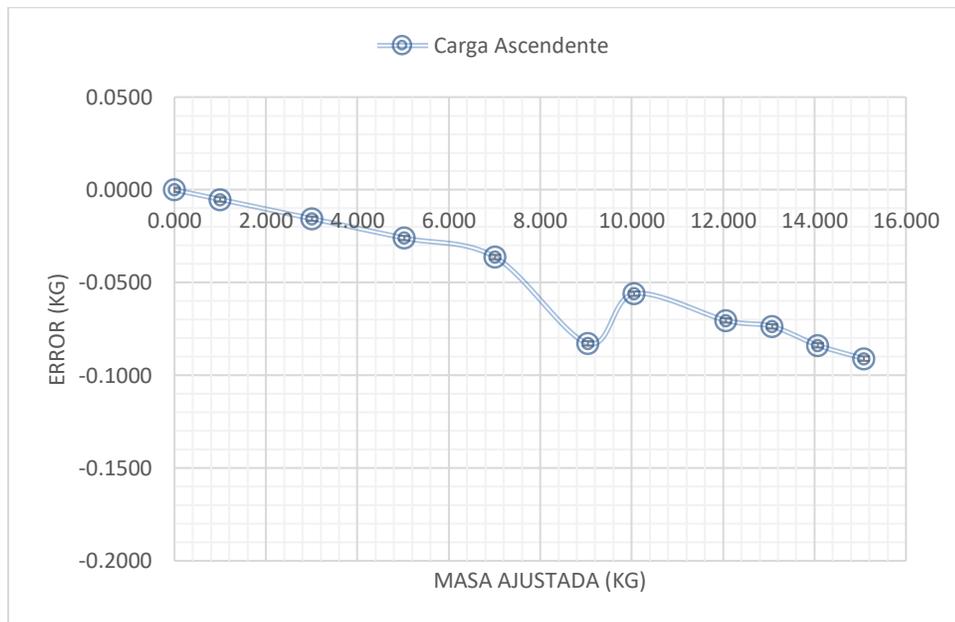


Figura 8. Curva de calibración para la inyección de combustible

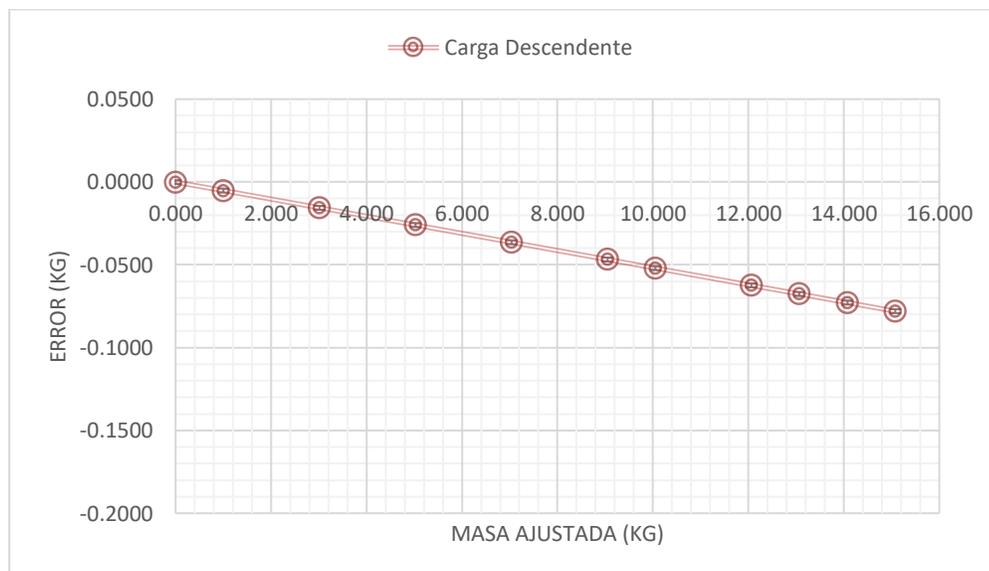


Figura 9. Curva de calibración para el consumo de combustible

## 4.2 Curvas características de operación del motor en función del tipo de combustible

Con el propósito de determinar las curvas características de operación del motor en función del tipo de combustible, es decir, gasolina corriente y gasolina extra, fueron considerados parámetros como la temperatura en cada uno de los procesos termodinámicos (admisión, compresión, expansión y escape), las revoluciones por minuto a la cual trabaja el motor y, también, la masa de combustible medida con la balanza Trumax. Las Tabla 10 y 11 muestran los parámetros de medición tanto para gasolina corriente como para gasolina extra, respectivamente.

**Tabla 10** – Datos de medición para gasolina corriente

Tiempo (s)	RP M	Masa inicial, Mi (g)	Masa Final, Mf (g)	Mi - Mf (g)	Densidad Gasolina (g/l)	Volumen Consumido (ml)	T2 - Compresión	T3 - Combustión	T4 - Combustible	T5 - Admisión	T6 - Escape
120	150	3820	3804	16	700	22.86	82	206	31	29	58
120		3804	3790	14	700	20.00	83	213	31	28	57
120		3795	3785	10	700	14.29	83	216	31	28	54
120		3790	3779	11	700	15.71	84	219	31	28	54
120	250	3784	3765	19	700	27.14	84	225	32	28	54
120		3770	3760	10	700	14.29	84	225	32	28	54
120		3765	3755	10	700	14.29	84	224	32	28	54
120		3760	3749	11	700	15.71	85	225	32	28	54
120	300	3754	3742	12	700	17.14	85	225	32	28	55
120		3747	3735	12	700	17.14	85	224	32	28	55
120		3740	3730	10	700	14.29	85	224	32	28	55
120		3735	3725	10	700	14.29	85	225	32	28	55
120	350	3730	3714	16	700	22.86	86	226	32	28	55
120		3719	3709	10	700	14.29	86	226	32	28	55
120		3714	3701	13	700	18.57	86	226	33	28	55
120		3706	3695	11	700	15.71	86	226	33	28	55

**Tabla 11 – Datos de medición para gasolina extra**

Tiempo (s)	RP M	Masa inicial, Mi (g)	Masa Final, Mf (g)	Mi - Mf (g)	Densidad Gasolina (g/l)	Volumen Consumido (ml)	T2 - Compresión	T3 - Combustión	T4 - Combustible	T5 - Admisión	T6 - Escape
120	150	3805	3790	15	700	21.43	52	197	43	27	60
120		3790	3781	9	700	12.86	53	204	43	27	59
120		3781	3776	5	700	7.14	53	207	43	27	56
120		3776	3770	6	700	8.57	54	210	43	27	56
120	250	3760	3756	4	700	5.71	54	216	44	27	56
120		3756	3751	5	700	7.14	54	216	44	27	56
120		3751	3746	5	700	7.14	54	215	44	27	56
120		3746	3740	6	700	8.57	55	216	44	27	56
120	300	3737	3733	4	700	5.71	55	216	44	27	57
120		3733	3726	7	700	10.00	55	215	44	27	57
120		3726	3721	5	700	7.14	55	215	44	27	57
120		3721	3716	5	700	7.14	55	216	44	27	57
120	350	3712	3705	7	700	10.00	56	217	44	27	57
120		3705	3700	5	700	7.14	56	217	44	27	57
120		3700	3692	8	700	11.43	56	217	45	27	57
120		3692	3686	6	700	8.57	56	217	45	27	57

Las tablas anteriores resumen los datos experimentales para cada uno de los combustibles evaluados. Se puede observar un ligero consumo de combustible mayor para el caso donde se usa la gasolina corriente en vez de la gasolina extra. Esto se discute en la sección siguiente donde se muestra el análisis del calor ganado y cedido para cada tipo de combustible, además del trabajo realizado en el proceso y la eficiencia térmica para cada caso.

#### 4.2.1 Análisis del consumo de combustible

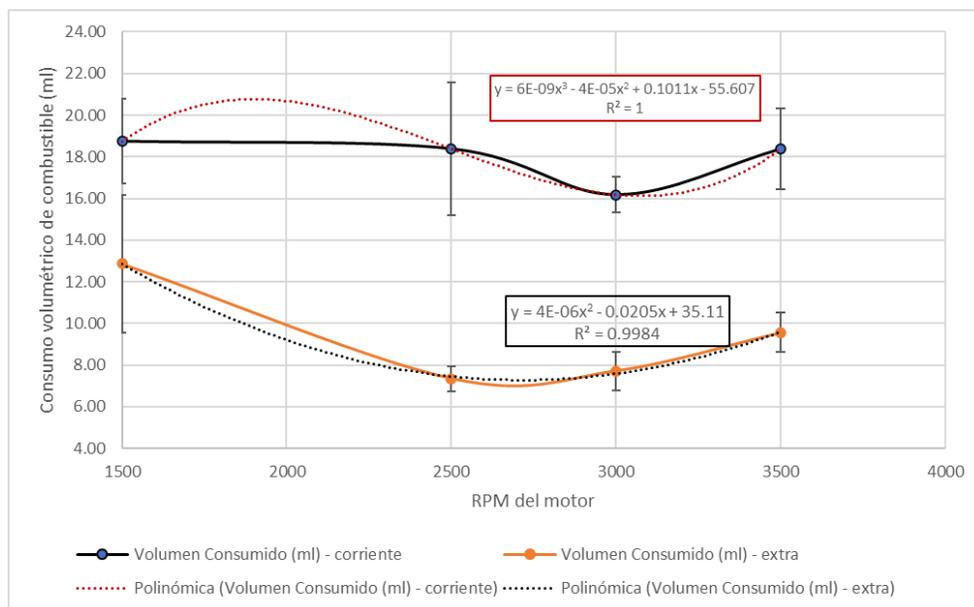
El consumo de combustible para cada situación es ilustrado en las tablas a seguir. Además, la Figura 10 ilustra el consumo de combustible en cada caso

**Tabla 12** – Consumo específico y volumétrico de combustible para la gasolina corriente

RPM	Mi - Mf (g) (promedio)	Mi - Mf (g) (Incertidumbre)	Volumen Consumido (ml) (promedio)	Volumen Consumido (ml) (Incertidumbre)
1500	12.75	1.38	18.75	2.02
2500	12.50	2.18	18.38	3.21
3000	11.00	0.58	16.18	0.85
3500	12.50	1.32	18.38	1.95

**Tabla 13** – Consumo específico y volumétrico de combustible para la gasolina extra

RPM	Mi - Mf (g) (promedio)	Mi - Mf (g) (Incertidumbre)	Volumen Consumido (ml) (promedio)	Volumen Consumido (ml) (Incertidumbre)
1500	8.75	2.25	12.87	3.31
2500	5.00	0.41	7.35	0.60
3000	5.25	0.63	7.72	0.93
3500	6.50	0.65	9.56	0.95

**Figura 10.** Comparación entre el consumo específico de combustible

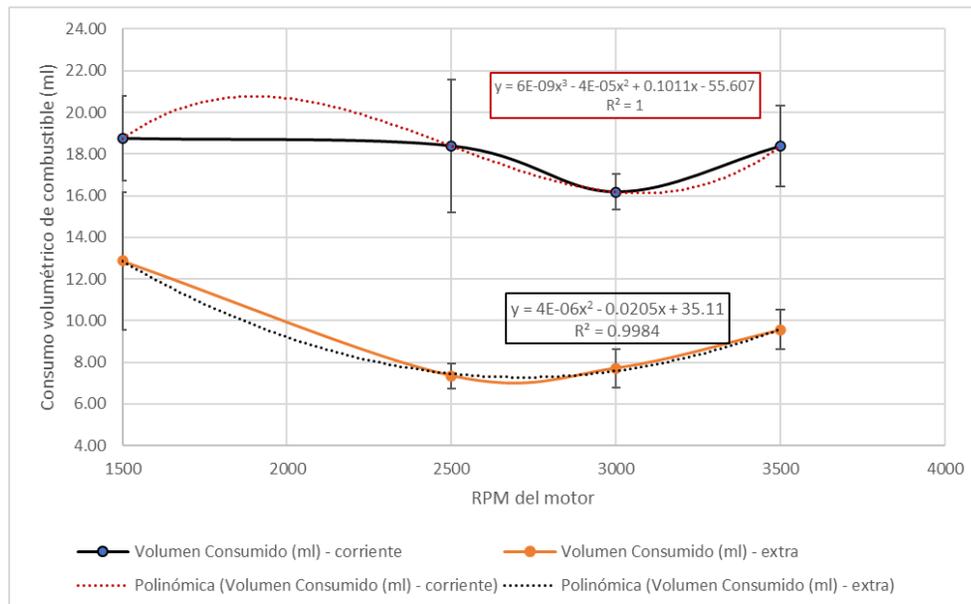


Figura 11. Comparación entre el consumo volumétrico de combustible

Las figuras anteriores confirman que el consumo de combustible aumenta cuando se usa gasolina corriente en vez de gasolina extra. Este comportamiento puede asociarse al octanaje y la pureza del combustible. Em ambos casos se observa que a medida que aumentan las revoluciones del motor existe un aumento lineal del consumo de combustible, sin embargo, este aumento corresponde al doble del consumo de gasolina corriente cuando comparado con la gasolina extra. Esto confirma aún más el desempeño del motor más adecuado para gasolina extra.

#### 4.2.2 Cálculo del calor de entrada al sistema, calor de salida y trabajo realizado

Los parámetros como  $Q_{in}$  (Calor de entrada) y  $Q_{out}$  (calor de salida) fueron calculados conforme las ecuaciones termodinámicas aplicadas al análisis de un ciclo de combustión tipo Otto. Las Tablas 14 y 15 muestran los valores calculados para cada situación.

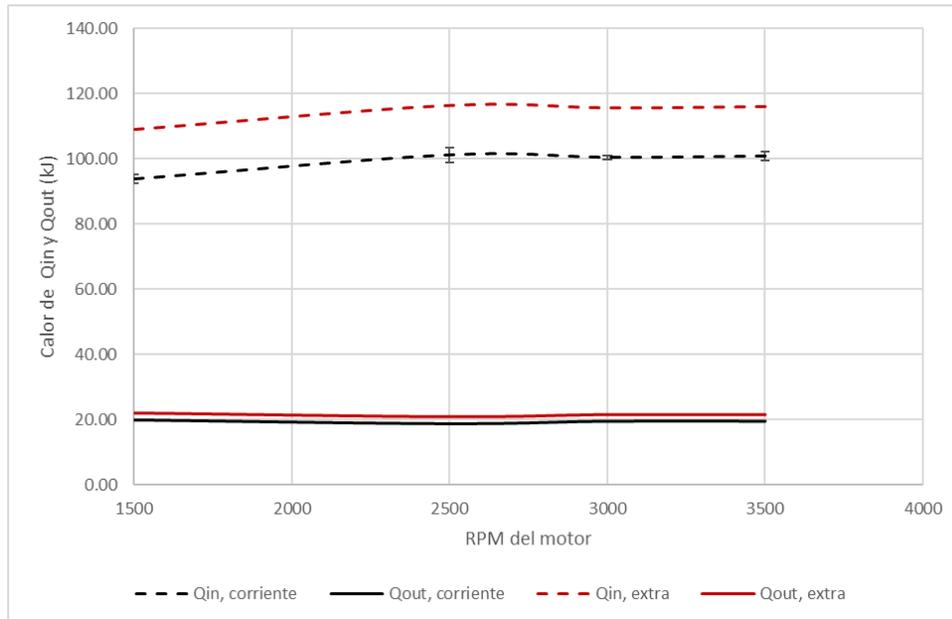
**Tabla 14** – Calor de entrada y el calor de salida del sistema – gasolina corriente

<b>RPM</b>	<b>Q<sub>in</sub></b>	<b>Q<sub>out</sub></b>
1500	93.96	19.80
2500	101.16	18.72
3000	100.44	19.44
3500	100.80	19.44

**Tabla 15** – Calor de entrada y el calor de salida del sistema – gasolina extra

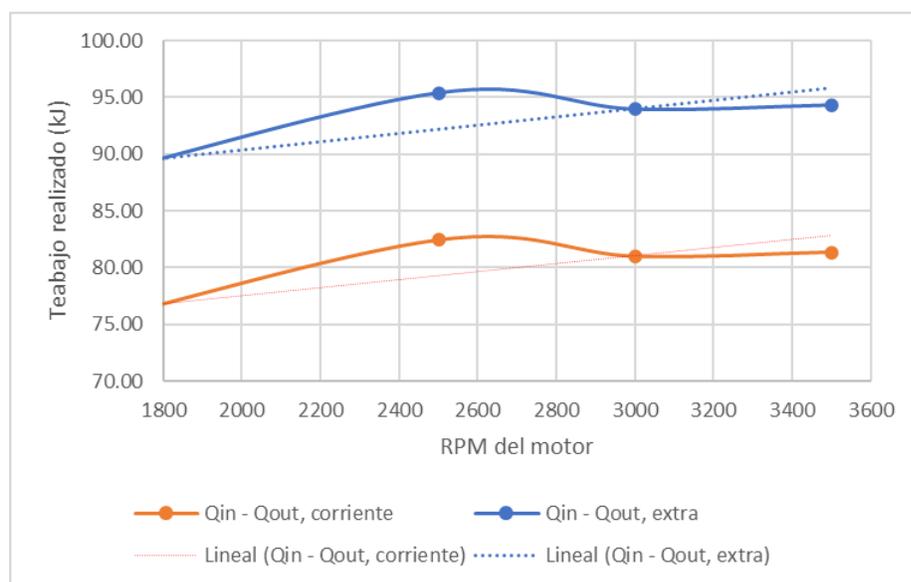
<b>RPM</b>	<b>Q<sub>in</sub></b>	<b>Q<sub>out</sub></b>
1500	109.08	22.14
2500	116.28	20.88
3000	115.56	21.60
3500	115.92	21.60

Comparando ambos resultados es posible observar que para el caso donde se usa la gasolina corriente el calor de entrada es menor que para el caso donde se usa la gasolina extra. Este parámetro era esperado debido a la composición química de ambos combustibles. Lo anterior se confirma en la siguiente figura donde se ilustra la diferencia entre cada situación analizada:



**Figura 12** – Calor de entrada al sistema ( $Q_{in}$ ) y calor de salida del sistema ( $Q_{out}$ )

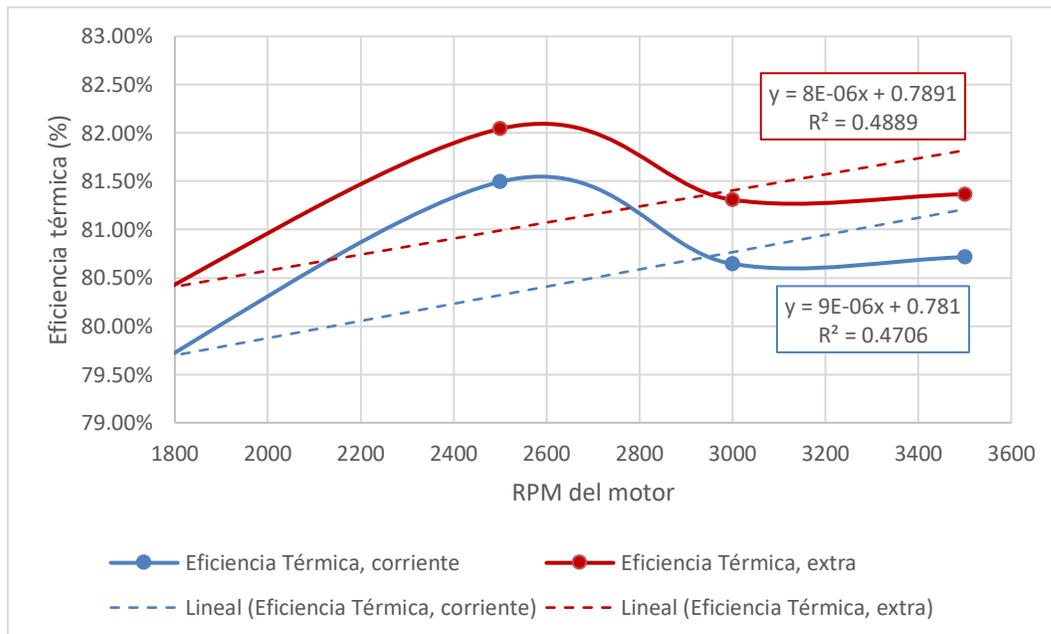
La diferencia entre el calor de entrada y salida al sistema permite determinar el trabajo realizado para cada tipo de combustible evaluado. Se confirma que el trabajo realizado por el motor cuando utiliza gasolina extra es mayor que cuando utiliza gasolina corriente. Esto se ilustra en la siguiente figura:



**Figura 13** – Trabajo realizado

### 4.2.3 Eficiencia térmica en función del tipo de combustible

En función del tipo de combustible, es decir, gasolina corriente y gasolina extra, fue determinada la eficiencia térmica del motor de combustión. El Apéndice B presenta los cálculos intermedios que se tuvieron en cuenta para cada combustible analizado. La Figura 14 presenta la curva del rendimiento térmico para cuando es utilizado gasolina extra (curva en color rojo) y cuando es utilizado gasolina corriente (curva en color azul). Se puede observar que para el primer caso existe un rendimiento mayor que para el segundo caso. Es interesante observar que ambas curvas de rendimiento siguen el mismo perfil lo que confirma que existe una coherencia en la naturaleza física del problema que está siendo abordado y, a su vez, confirma que en función de los componentes químicos de la gasolina extra, ésta produce un desempeño mayor cuando comparado con la gasolina corriente. Además, la curva de rendimiento presente un pico máximo de rendimiento en torno de 2700 RPM para ambas situaciones. Mientras que para la gasolina extra el rendimiento está en torno del 82% para la gasolina corriente el rendimiento está en torno del 81%. Valores muy próximos, sin embargo, debido al trabajo mecánico realizado en cada caso, esta diferencia puede ser considerable y, de hecho, en el consumo de combustible muestra su mayor desempeño.



**Figura 14** – Eficiencia térmica del motor en función del combustible y ecuación de rendimiento

### 4.3 Aplicación del método multicriterio Fuzzy-AHP para el análisis económico del proceso

A partir de la búsqueda bibliográfica, se identificaron los atributos (criterios y subcriterios) para evaluar las alternativas del uso de combustible. Por lo tanto, esta sección muestra el resultado de criterios y ponderaciones (pesos) de subcriterio al el método Fuzzy-AHP. En esta etapa, las matrices pareadas se completaron a partir de la opinión de los especialistas. A continuación, las Tablas 16 a 19 presentan los resultados de las matrices *Fuzzy* obtenidas:

Tabla 16 – Matriz de comparación *Fuzzy* – Criterios

Criterios	E			A			T		
	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>
E	( 1 ; 1 ; 1 )	( 6 ; 7 ; 8 )	( 1 ; 2 ; 3 )						
A	( 1/8 ; 1/7 ; 1/6 )	( 1 ; 1 ; 1 )	( 1/9 ; 1/9 ; 1/8 )						
T	( 1/3 ; 1/2 ; 1 )	( 8 ; 9 ; 9 )	( 1 ; 1 ; 1 )						

E: Económico; A: Ambiental; T: Técnico ; *l*: limite inferior; *m*: medianda; *u*: limite superior

Tabla 17 – Matriz de comparación *Fuzzy* – Subcriterios subordinados al criterio Económico

Subcriterios	E1			E2			E3		
	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>
E1	( 1 ; 1 ; 1 )	( 1/7 ; 1/6 ; 1/5 )	( 1/9 ; 1/8 ; 1/7 )						
E2	( 5 ; 6 ; 7 )	( 1 ; 1 ; 1 )	( 1/6 ; 1/5 ; 1/4 )						
E3	( 7 ; 8 ; 9 )	( 4 ; 5 ; 6 )	( 1 ; 1 ; 1 )						

Tabla 18 – Matriz de comparación *Fuzzy* – Subcriterios subordinados al criterio Ambiental

Subcriterios	A1			A2			A3		
	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>
A1	( 1 ; 1 ; 1 )	( 1/5 ; 1/4 ; 1/3 )	( 1/8 ; 1/7 ; 1/6 )						
A2	( 3 ; 4 ; 5 )	( 1 ; 1 ; 1 )	( 1 ; 2 ; 3 )						
A3	( 6 ; 7 ; 8 )	( 1/3 ; 1/2 ; 1 )	( 1 ; 1 ; 1 )						

Tabla 19 – Matriz de comparación *Fuzzy* – Subcriterios subordinados al criterio Técnico

Subcriterios	T1			T2			T3		
	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>
<b>T1</b>	( 1 ; 1 ; 1 )	( 6 ; 7 ; 8 )	( 2 ; 3 ; 4 )						
<b>T2</b>	( 1/8 ; 1/7 ; 1/6 )	( 1 ; 1 ; 1 )	( 1/6 ; 1/5 ; 1/4 )						
<b>T3</b>	( 1/4 ; 1/3 ; 1/2 )	( 4 ; 5 ; 6 )	( 1 ; 1 ; 1 )						

Cuando la matriz **crisp A** es consistente, significa que la matriz de comparación *Fuzzy* también es consistente (Patil y Kant, 2014). La Tabla 20 resume los resultados del Índice de Consistencia (IC), el Índice de Consistencia Aleatoria (IR) y el Índice de Consistencia (RC), para las matrices de criterios y subcriterios.

Tabla 20 – Cálculo de IC, IR y RC para las matrices de criterios e subcriterios

Dimensión	IC	IR	RC	Decisión: RC ≤ 0,10
Criterios	0.057	0.660	0.0859	OK
Subcriterio: Económico	0.040	0.660	0.0604	OK
Subcriterio: Ambiental	0.014	0.660	0.0208	OK
Subcriterio: Técnico	0.057	0.660	0.0859	OK

Se puede observar en la tabla anterior que todas las matrices alcanzan la condición de consistencia, porque el valor de RC calculado es inferior a 0,10 para todas las situaciones evaluadas. Las Tablas 21 y 22 presentan los pesos para los criterios y subcriterios, respectivamente.

Tabla 21 – Pesos de los criterios por el método FAHP

Criterios	PESO		
	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>
<b>Económico</b>	( 0.6667 ; 0.8221 ; 0.9615 )		
<b>Ambiental</b>	( 0.1073 ; 0.1228 ; 0.1456 )		
<b>Técnico</b>	( 0.3029 ; 0.3669 ; 0.4524 )		

De la tabla anterior, puede ser observado que el criterio más relevante al momento de implementar una alternativa para el uso de combustible está asociado al aspecto económico. Los especialistas afirman que el costo del combustible es crítico en este

análisis una vez que la gasolina, al ser un derivado del petróleo, tiene que enfrentarse a problemas de inestabilidad económica. La Tabla 22 consolida los resultados.

Tabla 22 – Pesos de los subcriterios por el método FAHP

CRITÉRIO	SUBCRITÉRIOS		PESO		
			<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>
Económico	E1	Costo del nivel de energía	( 0.0838	; 0.0917	; 0.1019 )
	E2	Costo de mantenimiento	( 0.3137	; 0.3542	; 0.4017 )
	E3	Costo del combustible	( 1.0122	; 1.1400	; 1.2599 )
Ambiental	A1	Emissiones de gases de efecto invernadero	( 0.0975	; 0.1098	; 0.1272 )
	A2	Consumo de combustible	( 0.4807	; 0.6667	; 0.8221 )
	A3	Vida útil del motor	( 0.4200	; 0.5061	; 0.6667 )
Técnico	T1	Rendimiento térmico	( 0.7631	; 0.9196	; 1.0583 )
	T2	Capacitación del personal técnico	( 0.0917	; 0.1019	; 0.1156 )
	T3	Períodos de mantenimiento del motor	( 0.3333	; 0.3952	; 0.4807 )

Se confirma, de forma evidente, que existen tres subcriterios a ser tenidos en cuenta, en su orden: Costo del combustible (Económico), Rendimiento térmico (Técnico) y Consumo de combustible (Ambiental). Los especialistas coinciden en afirmar que el costo del combustible, en un mercado fluctuante y aún dependiente del petróleo, es importante a la hora de tomar una decisión para el uso de combustibles en un motor de combustión interna.

Luego, se construyó la matriz de decisión  $\tilde{D}$ , conforme se muestra en la Tabla 23. A partir de estos datos fue posible la construcción de la matriz de decisión  $\tilde{D}$ .

Tabla 23 – Matriz de decisión  $\tilde{D}$ : evaluación de alternativas

Subcriterios	Alternativa 1			Alternativa 2			Alternativa 3		
	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>
E1	( 1.3 ; 2.5 ; 4.0 )	( 2.0 ; 3.5 ; 4.8 )	( 2.0 ; 3.3 ; 4.4 )						
E2	( 1.4 ; 2.0 ; 3.1 )	( 2.1 ; 3.5 ; 4.6 )	( 2.6 ; 3.8 ; 4.5 )						
E3	( 1.6 ; 2.8 ; 4.0 )	( 1.1 ; 2.0 ; 3.4 )	( 1.9 ; 3.0 ; 4.1 )						
A1	( 1.3 ; 2.5 ; 4.0 )	( 2.6 ; 4.0 ; 4.9 )	( 2.0 ; 3.5 ; 4.8 )						
A2	( 1.1 ; 1.8 ; 3.0 )	( 2.5 ; 3.8 ; 4.6 )	( 1.5 ; 2.8 ; 4.1 )						
A3	( 1.6 ; 3.0 ; 4.4 )	( 2.4 ; 3.8 ; 4.8 )	( 1.6 ; 3.0 ; 4.4 )						
T1	( 1.9 ; 3.3 ; 4.5 )	( 1.8 ; 3.3 ; 4.6 )	( 1.5 ; 3.0 ; 4.5 )						
T2	( 1.9 ; 3.3 ; 4.5 )	( 2.0 ; 3.5 ; 4.8 )	( 2.4 ; 3.8 ; 4.8 )						
T3	( 1.5 ; 2.8 ; 4.1 )	( 1.8 ; 3.3 ; 4.6 )	( 1.6 ; 3.0 ; 4.4 )						

Alternativa 1: Gasolina Extra; Alternativa 2: Gasolina Corriente; Alternativa 3: Otros combustibles

Tabla 24 – Peso total de los subcriterios por el método *Fuzzy* AHP ( $W_{Total}$ )

CRITERIO	SUBCRITERIOS		PESO TOTAL		
			<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>
Económico	E1	Costo del nivel de energía	( 0.0507 ; 0.0737 ; 0.0980 )		
	E2	Costo de mantenimiento	( 0.1900 ; 0.2846 ; 0.3862 )		
	E3	Costo del combustible	( 0.6131 ; <b>0.9158</b> ; 1.2114 )		
Ambiental	A1	Emissiones de gases de efecto invernadero	( 0.0078 ; 0.0092 ; 0.0117 )		
	A2	Consumo de combustible	( 0.0385 ; <b>0.0558</b> ; 0.0754 )		
	A3	Vida útil del motor	( 0.0337 ; 0.0424 ; 0.0611 )		
Técnico	T1	Rendimiento térmico	( 0.3528 ; <b>0.5061</b> ; 0.7338 )		
	T2	Capacitación del personal técnico	( 0.0424 ; 0.0561 ; 0.0801 )		
	T3	Períodos de mantenimiento del motor	( 0.1541 ; 0.2175 ; 0.3333 )		

Esta Tabla 24 mostró el peso de los subcriterios ponderado por el peso de su respectivo criterio. Esto confirma que los subcriterios a ser analizados son: Costo del combustible, Rendimiento térmico y Consumo de combustible. La Tabla 25 presenta los resultados.

Tabla 25 – Matriz de decisión normalizada y ponderada por el método *Fuzzy* AHP ( $\tilde{V}$ )

Subcriterios	Alternativa 1			Alternativa 2			Alternativa 3		
	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>L</i>	<i>m</i>	<i>u</i>
E1	( 0.0 ; 0.1 ; 0.1 )	( 0.0 ; 0.1 ; 0.1 )	( 0.0 ; 0.1 ; 0.1 )	( 0.0 ; 0.1 ; 0.1 )	( 0.0 ; 0.1 ; 0.1 )	( 0.0 ; 0.1 ; 0.1 )	( 0.0 ; 0.1 ; 0.1 )	( 0.0 ; 0.1 ; 0.1 )	( 0.0 ; 0.1 ; 0.1 )
E2	( 0.1 ; 0.2 ; 0.4 )	( 0.1 ; 0.2 ; 0.4 )	( 0.1 ; 0.2 ; 0.4 )	( 0.1 ; 0.2 ; 0.4 )	( 0.1 ; 0.2 ; 0.4 )	( 0.1 ; 0.2 ; 0.4 )	( 0.1 ; 0.3 ; 0.4 )	( 0.1 ; 0.3 ; 0.4 )	( 0.1 ; 0.3 ; 0.4 )
E3	( 0.3 ; 0.6 ; 1.1 )	( 0.2 ; 0.5 ; 0.8 )	( 0.2 ; 0.5 ; 0.8 )	( 0.2 ; 0.5 ; 0.8 )	( 0.2 ; 0.5 ; 0.8 )	( 0.2 ; 0.5 ; 0.8 )	( 0.2 ; 0.4 ; 0.8 )	( 0.2 ; 0.4 ; 0.8 )	( 0.2 ; 0.4 ; 0.8 )
A1	( 0.0 ; 0.1 ; 0.1 )	( 0.0 ; 0.1 ; 0.1 )	( 0.0 ; 0.1 ; 0.1 )	( 0.0 ; 0.1 ; 0.1 )	( 0.0 ; 0.1 ; 0.1 )	( 0.0 ; 0.1 ; 0.1 )	( 0.0 ; 0.1 ; 0.1 )	( 0.0 ; 0.1 ; 0.1 )	( 0.0 ; 0.1 ; 0.1 )
A2	( 0.2 ; 0.4 ; 0.8 )	( 0.4 ; 0.8 ; 1.1 )	( 0.4 ; 0.8 ; 1.1 )	( 0.4 ; 0.8 ; 1.1 )	( 0.4 ; 0.8 ; 1.1 )	( 0.4 ; 0.8 ; 1.1 )	( 0.4 ; 0.7 ; 1.0 )	( 0.4 ; 0.7 ; 1.0 )	( 0.4 ; 0.7 ; 1.0 )
A3	( 0.1 ; 0.3 ; 0.5 )	( 0.1 ; 0.3 ; 0.5 )	( 0.1 ; 0.3 ; 0.5 )	( 0.1 ; 0.3 ; 0.5 )	( 0.1 ; 0.3 ; 0.5 )	( 0.1 ; 0.3 ; 0.5 )	( 0.2 ; 0.3 ; 0.5 )	( 0.2 ; 0.3 ; 0.5 )	( 0.2 ; 0.3 ; 0.5 )
T1	( 0.3 ; 0.6 ; 1.0 )	( 0.3 ; 0.6 ; 1.0 )	( 0.3 ; 0.6 ; 1.0 )	( 0.3 ; 0.6 ; 1.0 )	( 0.3 ; 0.6 ; 1.0 )	( 0.3 ; 0.6 ; 1.0 )	( 0.2 ; 0.6 ; 1.0 )	( 0.2 ; 0.6 ; 1.0 )	( 0.2 ; 0.6 ; 1.0 )
T2	( 0.0 ; 0.1 ; 0.1 )	( 0.0 ; 0.1 ; 0.1 )	( 0.0 ; 0.1 ; 0.1 )	( 0.0 ; 0.1 ; 0.1 )	( 0.0 ; 0.1 ; 0.1 )	( 0.0 ; 0.1 ; 0.1 )	( 0.0 ; 0.1 ; 0.1 )	( 0.0 ; 0.1 ; 0.1 )	( 0.0 ; 0.1 ; 0.1 )
T3	( 0.1 ; 0.2 ; 0.5 )	( 0.1 ; 0.3 ; 0.5 )	( 0.1 ; 0.3 ; 0.5 )	( 0.1 ; 0.3 ; 0.5 )	( 0.1 ; 0.3 ; 0.5 )	( 0.1 ; 0.3 ; 0.5 )	( 0.1 ; 0.3 ; 0.5 )	( 0.1 ; 0.3 ; 0.5 )	( 0.1 ; 0.3 ; 0.5 )

Alternativa 1: Gasolina Extra; Alternativa 2: Gasolina Corriente; Alternativa 3: Otros combustibles

A partir de los resultados e la matriz normalizada y ponderada por el método *Fuzzy* AHP fue posible determinar la solución ideal *Fuzzy* positiva y negativa (FPIS e FNIS), considerando os valores máximos y mínimos de cada subcriterio.

A continuación, fueron determinadas las matrices de distancia  $A^+$  e  $A^-$ ; La Tabla 26 sintetiza los resultados.

Tabla 26 – Matriz de distancia total positiva y negativa

Subcriterios	Distancia total positiva ( $A^+$ )					Distancia total negativa ( $A^-$ )				
	A1	A2	A3	A4	A5	A1	A2	A3	A4	A5
E1	0.07	0.05	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
E2	0.26	0.22	0.21	0.19	0.18	0.15	0.19	0.22	0.23	0.24
E3	0.50	0.61	0.66	0.55	0.50	0.57	0.42	0.35	0.50	0.53
S1	0.06	0.05	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06	0.06	0.06
S2	0.69	0.43	0.45	0.55	0.59	0.33	0.63	0.59	0.54	0.48
S3	0.24	0.25	0.21	0.20	0.25	0.23	0.21	0.23	0.25	0.21
T1	0.47	0.46	0.49	0.50	0.53	0.52	0.52	0.49	0.49	0.47
T2	0.06	0.06	0.06	0.07	0.05	0.06	0.06	0.06	0.06	0.07
T3	0.29	0.28	0.28	0.30	0.29	0.24	0.27	0.27	0.25	0.25

A seguir se realiza un ranking de las alternativas consideradas en este estudio:

Tabla 27 – Cálculo del coeficiente de proximidad

Alternativas		Distancias		CCi
		D+	D-	
A1	Gasolina extra	2.0495	2.4494	0.5444
A2	Gasolina corriente	2.0964	2.3595	0.5295
A3	Otros	2.1743	2.2918	0.5132

Así, una vez que fue calculado coeficiente de proximidad (CCi), se pudo hacer el ranking de las mejores alternativas para el uso de combustible siendo así el resultado: Gasolina Extra (Alternativa 1), Gasolina Corriente (Alternativa 2), Otros (Alternativa 3). La siguiente figura ilustra el resultado final.

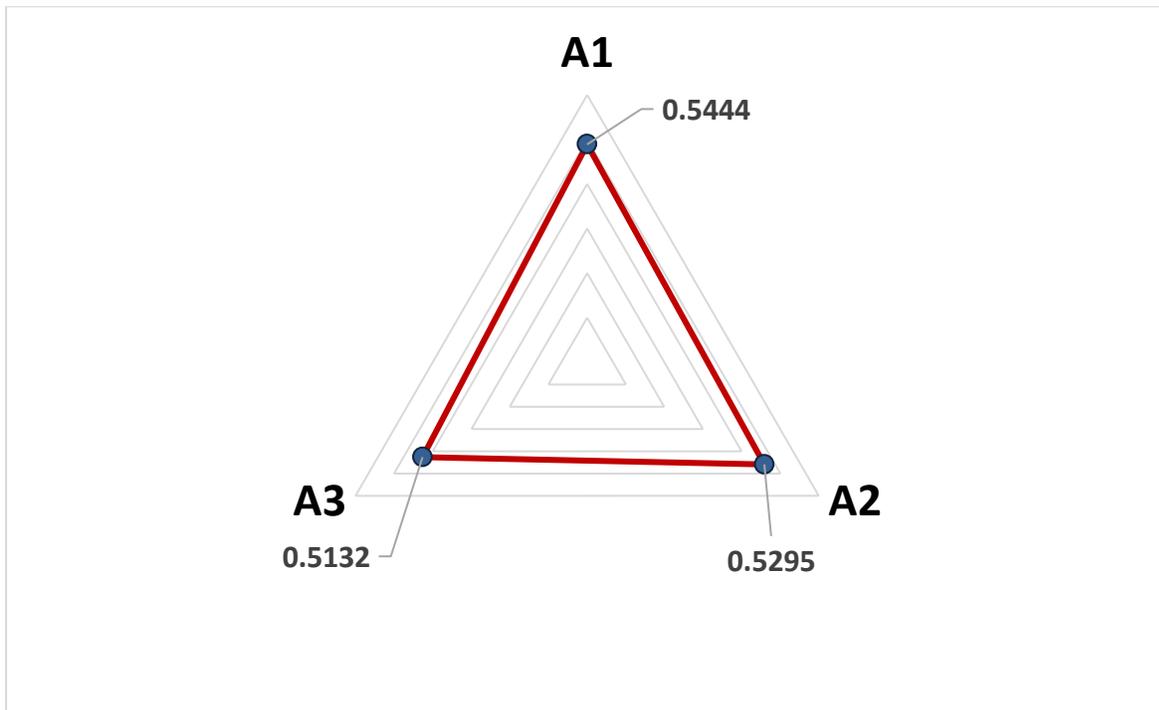


Figura 15 - Gráfico radar con la identificación del CCi para cada alternativa

Así, la figura del gráfico radar muestran que los índices de las alternativas 1 (Gasolina Extra) y 2 (Gasolina Corriente), se encuentra por el encima del promedio (0,5290). La alternativa 3, se encuentra, exactamente, al primer cuartil (0,5132).

## 5. Conclusiones y recomendaciones

Los resultados consolidados permitieron alcanzar el objetivo general del proyecto el cual era: Realizar un análisis térmico-económico de un motor de combustión interna a partir del uso de dos distintos combustibles disponibles comercialmente en el sector del transporte colombiano.

En relación al primer objetivo específico –*Estimar la incertidumbre asociada la medición asociada al consumo específico de combustible. Esto con el fin de evaluar la confiabilidad metrológica asociada al rendimiento del motor de combustión interna*– se aplicó el método GUM para el cálculo de la incertidumbre de medición asociada al consumo específico de combustible. Los resultados confirmaron que el consumo de combustible puede ser medido con un valor de incertidumbre igual a 0.01% del valor medido. Lo cual corresponde a un alto grado de confiabilidad metrológica considerando que la masa del combustible máxima está en torno de 5 kg.

En relación al segundo objetivo específico –*Evaluar, en función de dos tipos distintos de combustible, los parámetros que caracterizan el desempeño termodinámico del motor de combustión interna (RPM, consumo específico de combustible, calor de entrada y salida, eficiencia térmica), así como obtener las curvas características en condiciones reales de operación*– los resultados confirmaron que el uso de gasolina extra presenta un rendimiento térmico mayor en relación al uso de gasolina corriente. Además, el trabajo realizado y el calor de entrada al sistema es mayor para la situación donde es utilizado gasolina extra. Por lo anterior, los resultados confirman que debido a la composición química del combustible es más adecuado térmicamente el uso de gasolina extra en un motor de combustión interna.

Finalmente, para el tercer objetivo específico –*Realizar un análisis económico en cuanto a la factibilidad del uso de los dos combustibles utilizados para la operación del motor de combustión interna, utilizando en el método multicriterio Fuzzy-AHP (Analytic Hierarchy Process)*– el método multicriterio adoptado confirmó el impacto económico relacionado al uso de combustibles derivados del petróleo. Los resultados mostraron que el costo del combustible, el rendimiento térmico y el consumo de combustible son los parámetros más relevantes a tener en cuenta al momento de seleccionar un tipo de combustible para operar, con eficiencia y eficacia, un motor de combustión interna.

A partir de la experiencia aprendida, se proponen las siguientes recomendaciones como desdoblamiento natural para trabajos futuros:

- Utilizar aditivos y otros tipos de combustibles (bio-etanol, entre otros) para evaluar el desempeño térmico del motor de combustión interna.
- Mejorar el sistema de medición del consumo de específico de combustible mediante la instalación de una cámara protectora de la balanza que permita la disminución de vibraciones y la introducción indeseable de errores en el proceso de medición.
- Calibración frecuente de la instrumentación asociada al motor de combustión interna.
- Mantenimiento frecuente a todas las partes internas asociadas al motor de combustión interna.

## Apéndice A: Cálculos intermedios para la determinación del error cuadrático

- Cálculos para el polinomio de primer grado

POLINOMIO DE GRADO 1					
Punto	Masa indicada (Asc. e Desc.)	Masa ajustada	(Masa aparente - Masa ajustada) <sup>2</sup>	Desvio medio cuadrático	Valor t-student
	kg	kg	kg <sup>2</sup>	kg	
1	0.001	0.001	0.000	0.00011	2.0
2	0.997	1.002	0.000		
3	0.001	0.001	0.000		
4	2.993	3.009	0.000		
5	0.001	0.001	0.000		
6	4.998	5.024	0.000		
7	0.001	0.001	0.000		
8	6.977	7.013	0.000		
9	0.001	0.001	0.000		
10	8.964	9.011	0.000		
11	0.001	0.001	0.000		
12	9.996	10.048	0.000		
13	0.001	0.001	0.000		
14	11.992	12.054	0.000		
15	0.001	0.001	0.000		
16	12.994	13.062	0.000		
17	0.001	0.001	0.000		
18	13.989	14.062	0.000		
19	0.001	0.001	0.000		
20	14.987	15.065	0.000		
21	0.001	0.001	0.000		
22	0.000	0.000	0.000		
23	1.000	1.005	0.000		
24	0.000	0.000	0.000		
25	3.000	3.016	0.000		
26	0.000	0.000	0.000		
27	5.000	5.026	0.000		
28	0.000	0.000	0.000		
29	7.000	7.036	0.000		
30	0.000	0.000	0.000		
31	9.000	9.047	0.000		
32	0.000	0.000	0.000		
33	10.000	10.052	0.000		
34	0.000	0.000	0.000		
35	12.000	12.062	0.000		
36	0.000	0.000	0.000		
37	13.000	13.068	0.000		
38	0.000	0.000	0.000		
39	14.000	14.073	0.000		
40	0.000	0.000	0.000		
41	15.000	15.078	0.000		
42	0.000	0.000	0.000		

- **Cálculos para el polinomio de segundo grado**

POLINOMIO DE GRADO 2					
Punto	Masa indicada (Asc. e Desc.)	Masa ajustada	(Masa aparente - Masa ajustada) <sup>2</sup>	Desvio medio cuadrático	Valor t-student
	kg	kg	kg <sup>2</sup>	kg	
1	0.001	0.001	0.000	0.00019	2.0
2	0.997	1.002	0.000		
3	0.001	0.001	0.000		
4	2.993	3.009	0.000		
5	0.001	0.001	0.000		
6	4.998	5.024	0.000		
7	0.001	0.001	0.000		
8	6.977	7.013	0.000		
9	0.001	0.001	0.000		
10	8.964	9.011	0.000		
11	0.001	0.001	0.000		
12	9.996	10.048	0.000		
13	0.001	0.001	0.000		
14	11.992	12.054	0.000		
15	0.001	0.001	0.000		
16	12.994	13.062	0.000		
17	0.001	0.001	0.000		
18	13.989	14.062	0.000		
19	0.001	0.001	0.000		
20	14.987	15.065	0.000		
21	0.001	0.001	0.000		
22	0.000	0.000	0.000		
23	1.000	1.005	0.000		
24	0.000	0.000	0.000		
25	3.000	3.016	0.000		
26	0.000	0.000	0.000		
27	5.000	5.026	0.000		
28	0.000	0.000	0.000		
29	7.000	7.036	0.000		
30	0.000	0.000	0.000		
31	9.000	9.047	0.000		
32	0.000	0.000	0.000		
33	10.000	10.052	0.000		
34	0.000	0.000	0.000		
35	12.000	12.062	0.000		
36	0.000	0.000	0.000		
37	13.000	13.068	0.000		
38	0.000	0.000	0.000		
39	14.000	14.073	0.000		
40	0.000	0.000	0.000		
41	15.000	15.078	0.000		
42	0.000	0.000	0.000		

• **Cálculos para el polinomio de tercer grado**

POLINOMIO DE GRADO 3					
Punto	Masa indicada (Asc. e Desc.)	Masa ajustada	(Masa aparente - Masa ajustada) <sup>2</sup>	Desvio medio cuadrático	Valor t-student
	kg	kg	kg <sup>2</sup>	kg	
1	0.001	0.001	0.000	0.0377	2.0
2	0.997	1.002	0.000		
3	0.001	0.001	0.000		
4	2.993	3.009	0.000		
5	0.001	0.001	0.000		
6	4.998	5.024	0.001		
7	0.001	0.001	0.000		
8	6.977	7.013	0.001		
9	0.001	0.001	0.000		
10	8.964	9.011	0.002		
11	0.001	0.001	0.000		
12	9.996	10.048	0.003		
13	0.001	0.001	0.000		
14	11.992	12.054	0.004		
15	0.001	0.001	0.000		
16	12.994	13.062	0.005		
17	0.001	0.001	0.000		
18	13.989	14.062	0.005		
19	0.001	0.001	0.000		
20	14.987	15.065	0.006		
21	0.001	0.001	0.000		
22	0.000	0.000	0.000		
23	1.000	1.005	0.000		
24	0.000	0.000	0.000		
25	3.000	3.016	0.000		
26	0.000	0.000	0.000		
27	5.000	5.026	0.001		
28	0.000	0.000	0.000		
29	7.000	7.036	0.001		
30	0.000	0.000	0.000		
31	9.000	9.047	0.002		
32	0.000	0.000	0.000		
33	10.000	10.052	0.003		
34	0.000	0.000	0.000		
35	12.000	12.062	0.004		
36	0.000	0.000	0.000		
37	13.000	13.068	0.005		
38	0.000	0.000	0.000		
39	14.000	14.073	0.005		
40	0.000	0.000	0.000		
41	15.000	15.078	0.006		
42	0.000	0.000	0.000		

## Apéndice B: Cálculos para la eficiencia térmica del motor de combustión interna

- Para el caso de la gasolina corriente

Tiempo (s)	RPM	Masa inicial, Mi (g)	Masa Final, Mf (g)	Mi - Mf (g)	Densidad Gasolina (g/l)	Volumen Consumido (ml)
120	1500	3820	3804	16	680	23.53
120	1500	3804	3790	14	680	20.59
120	1500	3795	3785	10	680	14.71
120	1500	3790	3779	11	680	16.18
120	2500	3784	3765	19	680	27.94
120	2500	3770	3760	10	680	14.71
120	2500	3765	3755	10	680	14.71
120	2500	3760	3749	11	680	16.18
120	3000	3754	3742	12	680	17.65
120	3000	3747	3735	12	680	17.65
120	3000	3740	3730	10	680	14.71
120	3000	3735	3725	10	680	14.71
120	3500	3730	3714	16	680	23.53
120	3500	3719	3709	10	680	14.71
120	3500	3714	3701	13	680	19.12
120	3500	3706	3695	11	680	16.18

T2 - Compresión	T3 - Combustión	T4 - Combustible	T5 - Admisión	T6 - Escape	Cv (aire) [kJ/(kg*K)]
82	206	31	29	58	0.72
83	213	31	28	57	0.72
83	216	31	28	54	0.72
84	219	31	28	54	0.72
84	225	32	28	54	0.72
84	225	32	28	54	0.72
84	224	32	28	54	0.72
85	225	32	28	54	0.72
85	225	32	28	55	0.72
85	224	32	28	55	0.72

T2 - Compresión	T3 - Combustión	T4 - Combustible	T5 - Admisión	T6 - Escape	Cv (aire) [kJ/(kg*K)]
85	224	32	28	55	0.72
85	225	32	28	55	0.72
86	226	32	28	55	0.72
86	226	32	28	55	0.72
86	226	33	28	55	0.72
86	226	33	28	55	0.72

T3-T2	Qin	T6-T5	Qout	Eficiencia Térmica	Qin - Qout
124	89.28	29	20.88	76.61%	68.40
130	93.60	29	20.88	77.69%	72.72
133	95.76	26	18.72	80.45%	77.04
135	97.20	26	18.72	80.74%	78.48
141	101.52	26	18.72	81.56%	82.80
141	101.52	26	18.72	81.56%	82.80
140	100.80	26	18.72	81.43%	82.08
140	100.80	26	18.72	81.43%	82.08
140	100.80	27	19.44	80.71%	81.36
139	100.08	27	19.44	80.58%	80.64
139	100.08	27	19.44	80.58%	80.64
140	100.80	27	19.44	80.71%	81.36
140	100.80	27	19.44	80.71%	81.36
140	100.80	27	19.44	80.71%	81.36
140	100.80	27	19.44	80.71%	81.36
140	100.80	27	19.44	80.71%	81.36

- **Para el caso de la gasolina extra**

Tiempo (s)	RPM	Masa inicial, Mi (g)	Masa Final, Mf (g)	Mi - Mf (g), extra	Densidad Gasolina (g/l)	Volumen Consumido (ml) - extra
120	1500	3805	3790	15	680	22.06
120	1500	3790	3781	9	680	13.24
120	1500	3781	3776	5	680	7.35
120	1500	3776	3770	6	680	8.82
120	2500	3760	3756	4	680	5.88
120	2500	3756	3751	5	680	7.35
120	2500	3751	3746	5	680	7.35
120	2500	3746	3740	6	680	8.82
120	3000	3737	3733	4	680	5.88
120	3000	3733	3726	7	680	10.29
120	3000	3726	3721	5	680	7.35
120	3000	3721	3716	5	680	7.35
120	3500	3712	3705	7	680	10.29
120	3500	3705	3700	5	680	7.35
120	3500	3700	3692	8	680	11.76
120	3500	3692	3686	6	680	8.82

T2 - Compresión	T3 - Combustión	T4 - Combustible	T5 - Admisión	T6 - Escape	Cv (aire) [kJ/(kg*K)]
52	197	43	27	60	0.72
53	204	43	27	59	0.72
53	207	43	27	56	0.72
54	210	43	27	56	0.72
54	216	44	27	56	0.72
54	216	44	27	56	0.72
54	215	44	27	56	0.72
55	216	44	27	56	0.72
55	216	44	27	57	0.72
55	215	44	27	57	0.72
55	215	44	27	57	0.72
55	216	44	27	57	0.72
56	217	44	27	57	0.72

T2 - Compresión	T3 - Combustión	T4 - Combustible	T5 - Admisión	T6 - Escape	Cv (aire) [kJ/(kg*K)]
56	217	44	27	57	0.72
56	217	45	27	57	0.72
56	217	45	27	57	0.72

T3-T2	Qin, extra	T6-T5	Qout, extra	Eficiencia Térmica, extra	Qin - Qout, extra
145	104.40	33	23.76	77.24%	80.64
151	108.72	32	23.04	78.81%	85.68
154	110.88	29	20.88	81.17%	90.00
156	112.32	29	20.88	81.41%	91.44
162	116.64	29	20.88	82.10%	95.76
162	116.64	29	20.88	82.10%	95.76
161	115.92	29	20.88	81.99%	95.04
161	115.92	29	20.88	81.99%	95.04
161	115.92	30	21.60	81.37%	94.32
160	115.20	30	21.60	81.25%	93.60
160	115.20	30	21.60	81.25%	93.60
161	115.92	30	21.60	81.37%	94.32
161	115.92	30	21.60	81.37%	94.32
161	115.92	30	21.60	81.37%	94.32
161	115.92	30	21.60	81.37%	94.32
161	115.92	30	21.60	81.37%	94.32

## Bibliografía

Carretero, P.; García, J. M. “Gestión de la eficiencia energética: cálculo del consumo, indicadores y mejora” Carretero, P., & García, J. M. (2012). Gestión de la eficiencia energética: cálculo del consumo, indicadores y mejora. AENORediciones, 1–28. <https://doi.org/10.1126/science.aao427>,” AENORediciones, pp. 1–28, 2012, doi: 10.1126/science.aao4277.

Coling, G. *Energy, the Environment, and Human Health*, vol. 64, no. 12. 2015.

COSTA, H. G. Auxílio multicritério à decisão: método AHP. **Rio de Janeiro: Abepro**, 2006.

Dalkey, N., & Helmer, O. (1963). An experimental application of the Delphi method to the use of experts. *Management science*, 9(3), 458-467.

Energy Efficiency Market (EEM), “Market Report Series energy efficiency 2018 Market Report Series energy efficiency 2018.”

**EVO. International Performance Measurement & Verification Protocol Concepts and Options for Determining Energy and Water Savings Volume I. International Performance Measurement & Verification Protocol Committee.**: Efficiency Valuation Organization 2010.

FERNANDES, J. E. D. M.; GOMES, L.; SOARES DE MELLO, J. **Seleção de uma aeronave para atividades de charter regional: uma abordagem multicritério baseada no método NAIADE**: Artigo submetido para publicação em *Gestão e Produção* 2009.

GOMES, L. F. A. M.; GOMES, C. F. S. **Tomada de decisão gerencial: enfoque multicritério**. 4. São Paulo, Brasil: Editora Atlas SA, 2012. ISBN 8522488207.

International Energy Agency (IEA), “Energy Efficiency 2017: Market Report Series,” p. 143, 2017, doi: 10.1787/9789264284234-en.

Kreuzer, F. M. and Wilmsmeier, G., “Energy efficiency and mobility: A roadmap towards a greener economy in Latin America and the Caribbean,” 2014, [Online]. Available: <http://repositorio.cepal.org/handle/11362/37148>.

Ministry of Mines and Energy (MME), “Action Plan Indicative of Energy Efficiency 2017-2022,” p. 14, 2016, [Online]. Available: [http://www1.upme.gov.co/Documents/PAI\\_PROURE\\_2017\\_2022.pdf](http://www1.upme.gov.co/Documents/PAI_PROURE_2017_2022.pdf).

MORAES, L. F. **Avaliação multicritério de projetos de produção da indústria de petróleo no Brasil: uma análise comparativa dos métodos Prométhée e Todim**. 1999. Tese de Mestrado em Engenharia de Produção da UFF, Niterói

PITTERI, S. **Tomada De Decisão**. Clube de Autores, 2016.

Poveda, M. "Eficiencia Energética: Recurso No Aprovechado Propuesta Para Avanzar De Las Palabras a La Acción," *Olade*, 2007, [Online]. Available: [http://www.olade.org/sites/default/files/portal-ee/EFICIENCIA\\_ENERGÉTICA\\_RECURSO\\_NO\\_APROVECHADO-Agosto-2007.pdf](http://www.olade.org/sites/default/files/portal-ee/EFICIENCIA_ENERGÉTICA_RECURSO_NO_APROVECHADO-Agosto-2007.pdf)

REN, P. J. et al. A thermodynamic method of intuitionistic *fuzzy* MCDM to assist the hierarchical medical system in China. **Information Sciences**, v. 420, p. 490-504, Dec 2017. ISSN 0020-0255.

SAATY, T. L. Método de análise hierárquica. **Livro, São Paulo, Editora Makron**, 1991.

Scott, G. (2001). Strategic planning for high-tech product development. *Technology Analysis & Strategic Management*, 13(3), 343-364.

SHIH, H. S.; SHYUR, H. J.; LEE, E. S. An extension of TOPSIS for group decision making. **Mathematical and Computer Modelling**, v. 45, n. 7-8, p. 801-813, Apr 2007. ISSN 0895-7177.

Strand, J., Carson, R. T., Navrud, S., Ortiz-Bobea, A., & Vincent, J. R. (2017). Using the Delphi method to value protection of the Amazon rainforest. *Ecological Economics*, 131, 475-484.

UMM E, H.; ASGHAR, S.; IEEE. A Survey on Multi-Criteria Decision Making Approaches. International Conference on Emerging Technologies (ICET 2009), 2009, Islamabad, PAKISTAN. Ieee, Oct 19-20. p.321-+.

VELASQUEZ, M.; HESTER, P. T. An analysis of multi-criteria decision making methods. **International Journal of Operations Research**, v. 10, n. 2, p. 56-66, 2013.

Weizsacker, E.U. Von. Lovins, and L. H. Lovins, *Duplicar el bienestar con la mitad de los recursos naturales*. 1997.

Zeeman, H., Wright, C. J., & Hellyer, T. (2016). Developing design guidelines for inclusive housing: a multi-stakeholder approach using a Delphi method. *Journal of Housing and the Built Environment*, 31(4), 761-772.