

**“EVALUACIÓN ENERGÉTICA Y EXERGÉTICA DE UN MOTOR DE ENCENDIDO
PROVOCADO EXPERIMENTAL BAJO DIFERENTES GASOLINAS”**

UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK

**FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y
AMBIENTALES**

Trabajo de Fin de Carrera Titulado:

**“EVALUACIÓN ENERGÉTICA Y EXERGÉTICA DE UN MOTOR
DE ENCENDIDO PROVOCADO EXPERIMENTAL BAJO
DIFERENTES GASOLINAS”**

Realizado por:

VICTOR ALFONSO TAIPE DEFAZ

Director del proyecto:

Dr. Edilberto Antonio Llanes Cedeño

Como requisito para la obtención del título de:

**MASTER EN ECOEFICIENCIA INDUSTRIAL
CON MENCIÓN EN EFICIENCIA
ENERGÉTICA**

Quito, abril de 2020

**“EVALUACIÓN ENERGÉTICA Y EXERGÉTICA DE UN MOTOR DE ENCENDIDO
PROVOCADO EXPERIMENTAL BAJO DIFERENTES GASOLINAS”**

DECLARACION JURAMENTADA

Yo, VICTOR ALFONSO TAIPE DEFAZ, con cédula de identidad # 172168266- 2, declaro bajo juramento que el trabajo aquí desarrollado es de mi autoría, que no ha sido previamente presentado para ningún grado a calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración, cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su reglamento y por la normativa institucional vigente.



FIRMA
1721682662

**“EVALUACIÓN ENERGÉTICA Y EXERGÉTICA DE UN MOTOR DE ENCENDIDO
PROVOCADO EXPERIMENTAL BAJO DIFERENTES GASOLINAS”**

DECLARATORIA

El presente trabajo de investigación titulado:

**“EVALUACIÓN ENERGÉTICA Y EXERGÉTICA DE UN MOTOR DE ENCENDIDO
PROVOCADO EXPERIMENTAL BAJO DIFERENTES GASOLINAS”**

Realizado por:

VICTOR ALFONSO TAIPE DEFAZ

como Requisito para la Obtención del Título de:

**MASTER EN ECOEFICIENCIA INDUSTRIAL
CON MENSIÓN EN EFICIENCIA ENERGÉTICA**

ha sido dirigido por el profesor

EDILBERTO ANTONIO LLANES CEDEÑO

quien considera que constituye un trabajo original de su autor



FIRMA

**“EVALUACIÓN ENERGÉTICA Y EXERGÉTICA DE UN MOTOR DE ENCENDIDO
PROVOCADO EXPERIMENTAL BAJO DIFERENTES GASOLINAS”**

LOS PROFESORES INFORMANTES

Los Profesores Informantes:

PhD. JAVIER MARTÍNEZ GÓMEZ

MSc. PAOLO SALAZAR ALVEAR

Después de revisar el trabajo presentado,

lo han calificado como apto para su defensa oral ante

el tribunal examinador



PhD. JAVIER MARTÍNEZ GÓMEZ



MSc. PAOLO SALAZAR ALVEAR

Quito, abril de 2020

“EVALUACIÓN ENERGÉTICA Y EXERGÉTICA DE UN MOTOR DE ENCENDIDO PROVOCADO EXPERIMENTAL BAJO DIFERENTES GASOLINAS”

DEDICATORIA

A Dios por darme la salud, inteligencia, sabiduría y fortaleza en cada una de las decisiones que he afrontado.

A mis padres Arturo y Laura por su amor, ejemplo, valores y apoyo incondicional a lo largo de mi vida, por hacerme notar que cada día puedo ser mejor, hoy más que ayer.

A mis hermanos Luis, Cristian, Karina y Santiago y a todos mis familiares y amigos que aportaron con un mensaje de aliento para seguir adelante.

A Naty, porque eres más que especial, por tu admiración, por creer en mí y porque sentí tu apoyo en todo momento, una amistad como la tuya no se compara a ninguna.

¡Gracias por todo!

**“EVALUACIÓN ENERGÉTICA Y EXERGÉTICA DE UN MOTOR DE ENCENDIDO
PROVOCADO EXPERIMENTAL BAJO DIFERENTES GASOLINAS”**

AGRADECIMIENTO

A Dios por haberme permitido tener esta experiencia.

A mis padres por su apoyo incondicional.

A la Universidad Internacional SEK por su apertura a mi formación profesional y personal.

Al Dr. Edilberto LLanes quien dirigió esta investigación y aportó su asesoría durante el desarrollo de la misma.

Gracias

“EVALUACIÓN ENERGÉTICA Y EXERGÉTICA DE UN MOTOR DE ENCENDIDO PROVOCADO EXPERIMENTAL BAJO DIFERENTES GASOLINAS”

Resumen

El motor de combustión interna posee grandes aplicaciones en sistemas de generación, cogeneración de energía e industria automovilística, por lo tanto, ensayar y estudiar el rendimiento de estos motores es muy importante para contribuir a un mayor crecimiento de su campo de aplicación, calidad de operación, disminución de pérdidas de energía y reducción de emisiones de gases contaminantes. El análisis energético está basado en el balance energético el cual refleja la cantidad de energía distribuida en conversión, transferencia, uso y pérdidas, sin embargo, este no refleja la calidad de la energía el cual está basado en un análisis exergético. El propósito de este trabajo de investigación es evaluar el desempeño de un motor de encendido provocado experimental mediante el balance de energía y exergía, bajo el uso individual de las tres gasolinas comercializadas en el Ecuador; Súper, Extra y Ecopaís, para la valoración y evaluación de su rendimiento. La metodología experimental aplicada para evaluar el motor consistió en la puesta en marcha bajo el uso individual de las gasolinas hasta alcanzar su máxima potencia a una velocidad de giro del motor, donde se tomaron mediciones de temperatura, consumo específico del combustible y la relación aire combustible para un tiempo de 3 minutos. Los resultados muestran una eficiencia energética de 11,31% para gasolina Súper, 10,75% para gasolina Extra y 10,39% para gasolina Ecopaís. En lo relacionado a la eficiencia exergética se estableció un 58,81% para la gasolina Súper, 58,89% para la gasolina Extra y un 59,19% para la gasolina Ecopaís. Como se puede observar la eficiencia exérgica es mucho mayor a la eficiencia energética en cada uno de los casos, esto se debe a que el motor es ineficiente y que existe un potencial exergético de mejoramiento (PEM) que puede aprovechar la exergía que se está destruyendo para convertirla en trabajo y así lograr aumentar la eficiencia energética.

Palabras clave: energía, exergía, rendimiento, motor (MCI)

“EVALUACIÓN ENERGÉTICA Y EXERGÉTICA DE UN MOTOR DE ENCENDIDO PROVOCADO EXPERIMENTAL BAJO DIFERENTES GASOLINAS”

Abstract:

Internal combustion engines have great applications in generation systems, energy cogeneration and the automotive industry, therefore, testing and studying the performance of these engines is very important to contribute to further growth in their field of application, quality of operation, reduction of energy losses and reduction of polluting gas emissions. The energy analysis is based on the energy balance which reflects the amount of energy distributed in conversion, transfer, use and losses, however it does not reflect the quality of the energy which is based on an exergetic analysis. The purpose of this research work is to evaluate the performance of an experimental ignition engine by means of the energy balance and exergy, under the individual use of the three gasoline sold in Ecuador; Super, Extra and Ecopaís, for the assessment and evaluation of their performance. The experimental methodology applied to evaluate the engine consisted of starting under the individual use of gasoline until reaching its maximum power at a speed of the engine, where measurements of temperature, specific fuel consumption and the air-fuel ratio were taken for a time of 3 minutes. The results show an energy efficiency of 11.31% for Super gasoline, 10.75% for Extra gasoline and 10.39% for Ecopaís gasoline. Regarding exergy efficiency, 58.81% was determined for Super gasoline, 58.89% for Extra gasoline and 59.19% for Ecopaís gasoline. As it can be seen the energetic efficiency is much higher than the energy efficiency in each of the cases, this is because the motor is inefficient and there is an exergy potential for improvement (PEM) that can take advantage of the exergy that is being destroyed to turn it into work and thus achieve increased energy efficiency.

Keywords: energy, exergy, performance, motor (MCI)

“EVALUACIÓN ENERGÉTICA Y EXERGÉTICA DE UN MOTOR DE ENCENDIDO PROVOCADO EXPERIMENTAL BAJO DIFERENTES GASOLINAS”

1. Introducción

Los motores de combustión interna poseen grandes aplicaciones en sistemas de generación, cogeneración de energía e industria automovilística. Por lo tanto, ensayar y estudiar el rendimiento de estos motores es muy importante para contribuir a un mayor crecimiento de su campo de aplicación y calidad de operación (Federal, Ufes, Tecnológico, & Mecânica, 2015).

El motor de combustión interna tiene una mayor entrega y una mayor actividad dentro del sector del transporte, dentro del cual el uso de combustibles y el aumento de las emisiones están relacionados con procesos industriales que impulsan una fuerte actividad económica de comercialización y aseguramiento de bienes e insumos (Ramírez y Arcila, 2017). En el Ecuador el sector del transporte representa un 49 % del consumo energético total (Balance energético, 2017), representando un 25 % de las emisiones de gases de efecto invernadero por la combustión de las gasolinas (AIE, 2019). Por lo tanto, realizar el análisis energético y exergético a un motor de combustión interna bajo el uso de las gasolinas comercializadas en el Ecuador y condiciones de altura permite conocer su comportamiento con cada una de ellas y a la vez seleccionar la mejor con el objetivo de disminuir las emisiones de gases, el ahorro de combustibles y mejorar la sostenibilidad.

Las medidas de eficiencia energética en el transporte pueden adoptar muchas formas, entre ellas: gestionar la demanda de viajes para reducir la frecuencia y la distancia, así como la dependencia de los modos de alta intensidad energética (por ejemplo, automóvil y aire); desplazamiento a los modos más eficientes; medidas de eficiencia operativa y de nivel de sistema (AIE, Seguimiento del transporte, 2019).

El motor de combustión interna (MCI) es la planta de energía más eficiente y confiable en el sector de transporte (motores de gasolina y diésel) y maquinaria pesada (motor diésel). Se espera que los motores MCI estén presentes hasta que: (i) la escasez de combustible se convierta en un problema grave; (ii) se desarrollen nuevas tecnologías menos contaminantes y

más eficientes como reemplazo; o (iii) las regulaciones de emisiones, establecidas por agencias ambientales para mejorar la calidad del aire se vuelvan inalcanzables para los fabricantes de motores y vehículos (Erdiwansyah et al., 2019).

La industria automotriz ha intentado dedicar todos sus recursos con el objetivo de lograr los requisitos de reducción de emisiones estándar derivados de sus vehículos. La reducción de emisiones del motor de combustión está enfocada a reducir los problemas ambientales y las contaminaciones del aire (Tamilselvan, Nallusamy, & Rajkumar, 2017).

La industria del sector automotriz desde el siglo pasado ha venido analizando diseños de motores con el propósito de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero como dióxido de carbono (CO_2), óxidos de nitrógeno (NO_x), monóxido de carbono (CO) y material particulado (PM) los cuales son responsables principales de la degradación del medio ambiente (Li, Jia, Kokjohn, Chang, & Reitz, 2018).

Las mejoras también han incrementado gracias al uso de combustibles con mejores propiedades, sin embargo, el uso de esta variedad de combustibles solo es una parte de la solución. Uno de los factores importantes que determinan la calidad de las gasolinas es el llamado octanaje, que no es más que una cuantificación de la calidad y capacidad antidetonante de las gasolinas, su principal característica es identificar el proceso de la combustión en el interior del motor, un alto octanaje representa una mejor capacidad antidetonante. En Sudamérica por ejemplo las naftas con mayores índices de octano son Argentina y Perú con 98, seguido por Brasil con 95 y Colombia con 92 octanos respectivamente (Beltrán, 2017).

En el Ecuador se venden 3 tipos de gasolinas que provienen de las Refinerías; Estatal de Esmeraldas, Libertad y Shushufindi. Según la NORMA INEN 935, las gasolinas se clasifican de acuerdo a su octanaje en dos tipos:

- Gasolina Súper con 92 octanos como mínimo.
- Gasolina Extra y Ecopaís con 87 octanos como mínimo.

El combustible Ecopaís se define como un biocombustible el cual contiene una mezcla de 95 % de nafta premezclada y 5 % de etanol, esta mezcla es elaborada directamente en los tanques de los camiones transportadores en el terminal de Hidrocarburos de Pascuales, en la ciudad de Guayaquil donde es principalmente vendida (Antonio y Chifla, 2016).

Los avanzados motores de combustión interna (MCI) deben tener propiedades técnicas, económicas y ambientales superiores que ayuden a mantener la competitividad técnica y comercial dentro del mercado de vehículos automotrices el cual cambia rápidamente. Los motores de combustión interna están siendo diseñados continuamente para garantizar una potencia de salida específica combinada con la mayor eficiencia posible dentro de los regímenes de operación constantes e inestables y a la vez para cumplir con las regulaciones de emisiones de gases contaminantes que son cada vez más desafiantes (Dolatabadi et al., 2019).

Por lo tanto, para minimizar la relación excesiva de los combustibles fósiles no renovables, los automóviles se están desarrollando hacia la diversificación energética. La utilización de combustibles renovables como el biogás, los alcoholes, los aceites vegetales o de semillas y el biodiesel están ganando importancia para su uso en los motores MC, debido a que son ambientalmente aceptables, están disponibles localmente y abundantemente, están distribuidos uniformemente en todo el mundo, son técnicamente factibles y pueden satisfacer la demanda mundial de energía (Mofijur, Rasul, Hyde, y Bhuyia, 2015).

La crisis energética y la contaminación ambiental siguen siendo las dos cuestiones clave para el futuro crecimiento industrial. El desarrollo de la industria automotriz que continúa aumentando ha tenido un impacto en la escasez de energía. La creciente demanda de combustibles alternativos y el uso de petróleo son los mayores desafíos porque las personas

quieren garantizar la seguridad energética a nivel mundial (Q. Wang et al., 2019).

El análisis energético, también conocido como análisis del balance energético, se fundamenta en la primera ley de la termodinámica. Las características de distribución de energía del motor se pueden obtener cuantificando el flujo de energía dentro y fuera del sistema térmico. Las características de distribución de energía reflejan la conversión, transferencia, utilización y pérdida de energía del combustible en términos de cantidad. Con esta característica como guía, se pueden utilizar medidas específicas para reducir la pérdida de energía. Sin embargo, el balance energético no refleja la diferencia en la calidad energética, término que si es considerado por la segunda ley de la termodinámica, el estudio de la exergía puede evaluar la calidad de la energía para lograr la reutilización total de la energía perdida (X. Wang, Sun, y Luo, 2019).

Con respecto al balance energético de los motores MCI, hasta el 55% de la energía de entrada se pierde en el medio ambiente a través de los gases de escape y varios procesos de intercambio de calor entre la configuración del motor, el refrigerante y el aceite lubricante. Por lo tanto, recuperar este calor residual y convertirlo en trabajo útil es un método obvio para mejorar la eficiencia general del motor de combustión (Morgan, Dong, Panesar, y Heikal, 2016). En la figura 1 se indica los porcentajes de rendimiento que tiene un motor de MCI.

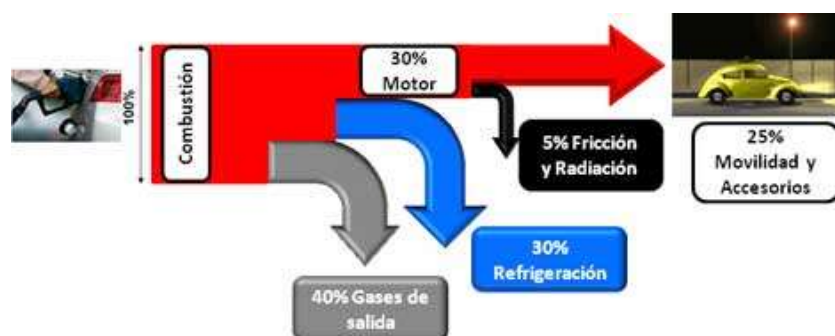


Figura 1 Diagrama Sankey motor (Razmara, Bidarvatan, Shahbakhti, y Robinett, 2016)

Aproximadamente, el 25% de la energía es utilizado para realizar un trabajo efectivo de propulsión del vehículo

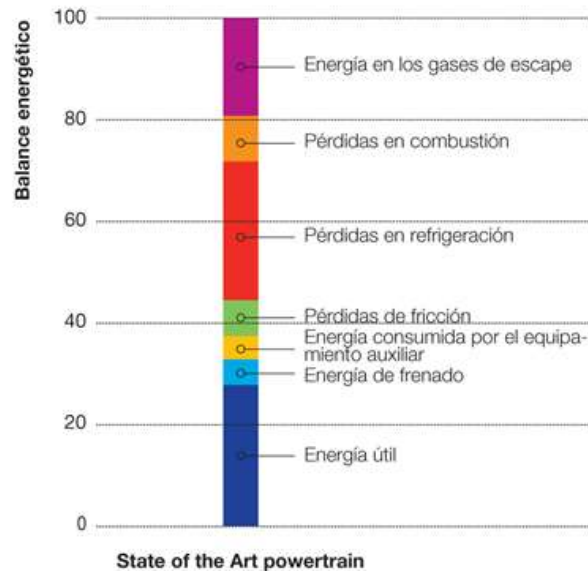


Figura 2 Balance térmico del motor de combustión interna (Kalghatgi, 2019)

Por lo mencionado previamente el actual estudio de investigación tiene como objetivo general: evaluar el desempeño de un motor de encendido provocado experimental mediante el balance de energía y exergía, bajo el uso individual de las tres gasolinas comercializadas en el Ecuador; Súper, Extra y Ecopaís, para la valoración y evaluación de su rendimiento.

Para cumplir con el objetivo general se llevan a cabo los siguientes objetivos específicos:

1. Obtener medidas de par motor (M) y número de revoluciones (n) a través del banco experimental del motor de encendido provocado con las gasolinas Súper, Extra y Ecopaís, para el cálculo de la potencia.
2. Obtener el consumo específico de combustible (b_e), por medio de la instrumentación del banco experimental para unas revoluciones fijas de 2500 rpm y $5,1 \text{ cm}^3$, para el cálculo del flujo másico de combustible.

“EVALUACIÓN ENERGÉTICA Y EXERGÉTICA DE UN MOTOR DE ENCENDIDO PROVOCADO EXPERIMENTAL BAJO DIFERENTES GASOLINAS”

6

3. Obtener medidas de temperaturas del ambiente, gases de escape y flujo volumétrico de aire a través del banco de pruebas modular para motores de un cilindro con el uso de las gasolinas Super, Extra y Ecopaís, para el cálculo del rendimiento energético y exergético.
4. Seleccionar una metodología adecuada de cálculo del rendimiento energético y exergético de un motor de encendido provocado, mediante la revisión de la literatura para la aplicación en el objeto de estudio.
5. Realizar una comparación entre los rendimientos energéticos y exergéticos de un motor de encendido provocado con el uso de las diferentes gasolinas, por medio del diagrama de Sankey, para la evaluación de la mejor alternativa.

Método

El motor de combustión interna (MCI) es un motor térmico que transforma la energía química en energía mecánica, generalmente disponible en un eje de salida giratorio. La energía química del combustible se transforma primero en energía térmica mediante la combustión u oxidación con el aire en el interior del motor, luego de la combustión, los reactantes se transforman en productos como dióxido de carbono (CO_2), agua (H_2O) y monóxido de carbono (CO). La energía térmica incrementa la presión y la temperatura de los gases en el interior del motor, el gas a alta presión se expande contra los mecanismos mecánicos del motor (Venkata Sundar Rao, Kurbet, y Kuppast, 2018), aquel gas es una combinación de aire, combustible, gases residuales y de escape recirculados. La Figura 3, indica que las paredes de la cámara de combustión conforman límites del sistema. Utilizando la primera ley de la termodinámica, la Ecuación 1 que acompaña a la Figura 3, corresponde a decir que “el cambio de la energía del sistema (E_{sis}), asumiendo que no hay pérdidas de energía en deformaciones del volumen de control, se reduce al cambio de la energía interna del sistema (U)” (Llanes-Cedeño, Carguachi-Caizatoa, y Rocha-Hoyos, 2018).

Modelo termodinámico del motor de combustión interna

1. Energía del sistema (E_{sis})
2. Energía suministrada al sistema con el combustible (Q_{comb})
3. Carga de admisión ($m_{\text{adm}}*h_{\text{adm}}$)
4. Trabajo mecánico (W)
5. Calor disipado a través del refrigerante (Q_{refr})
6. Calor de los gases de escape ($m_{\text{esc}}*h_{\text{esc}}$)
7. Calor equivalente de los gases de la cámara que se fugan a través de intersticios entre los segmentos ($m_{\text{fug}}*h_{\text{fug}}$).

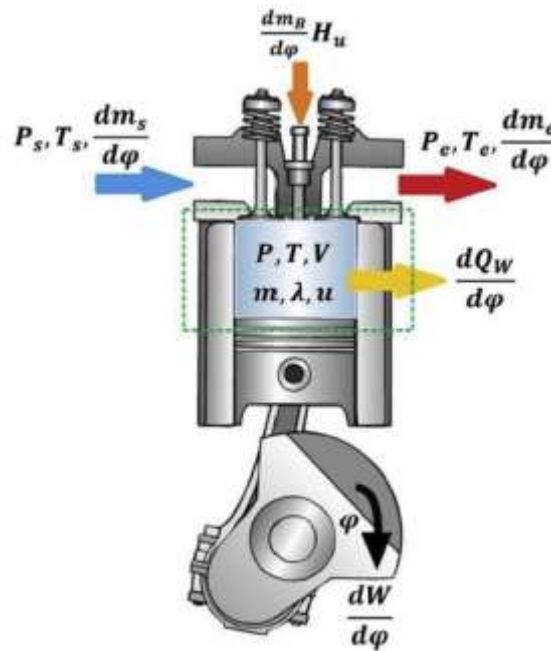


Figura 3 Modelo termodinámico MCI (Yao, Qian, Li, y Hu, 2019)

$$\frac{dE_{sis}}{dt} = \frac{dU}{dt} = \frac{dQ_{comb}}{dt} + \frac{dQ_{refr}}{dt} + \frac{dW}{dt} + \frac{dm_{adm}}{dt} h_{adm} + \frac{dm_{esc}}{dt} h_{esc} + \frac{dm_{fug}}{dt} h_{fug} \quad [1]$$

En lo relacionado al alcance, el siguiente estudio es de tipo experimental, pues se fundamenta en el manejo de una o varias variables experimentales no comprobadas, en circunstancias estrictamente controladas, con el objetivo de explicar de qué modo o por qué motivo se produce una circunstancia o situación particular (Cabezas & Andrade, 2018).

El motor que se sujeta a investigación es un motor de gasolina CT 150 de 1 cilindro y 4 tiempos refrigerado con aire, con formación externa de la mezcla. Con un peso aproximado de 15 kg, dimensiones L x A x H (420 x 300 x 320 mm), longitud de la biela: L = 73 mm; r = 21; λ = 0,288, potencia aproximada de 2 kW, volumen de aceite 0,6 L; tensión de encendido magnético, compresión 7:1, Sonda térmica de temperatura de gases de escape de 0-1000 °C, polea de transmisión Ø 125 mm, correa trapezoidal tipo SPA 1250 (ver Figura 4).

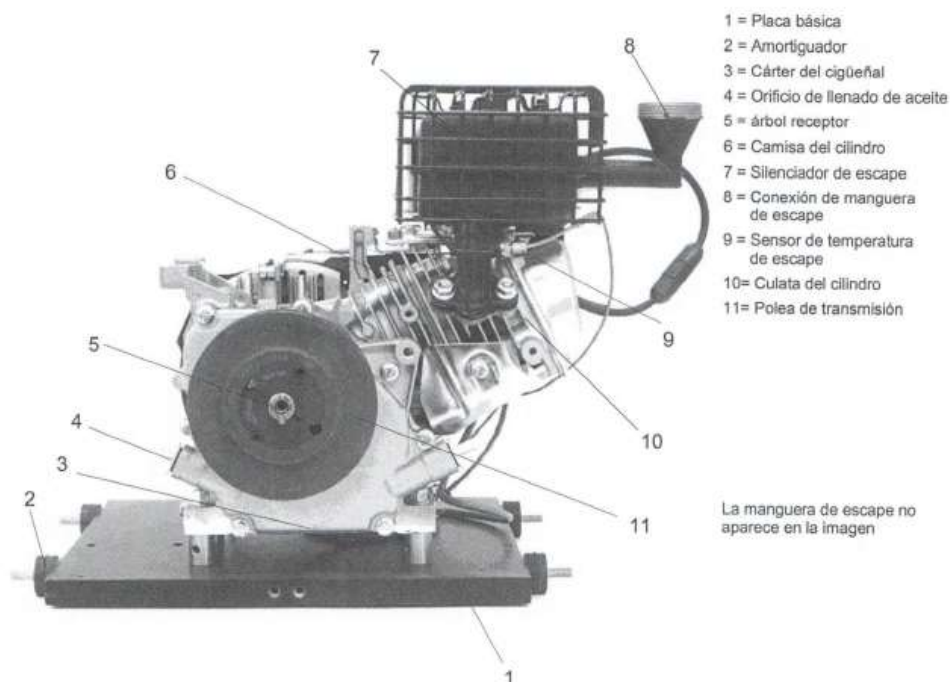


Figura 4 Motor CT 150

Para la ejecución de la investigación, se emplearon los siguientes instrumentos y materiales:

- Motor a gasolina de 1 cilindro refrigerado por aire.
- Unidad universal de frenado y accionamiento HM 365
- Gasolina SÚPER, EXTRA y ECOPAIS.

Para la obtención de la curva de potencia se cumplió con los siguientes pasos:

- Colocar en marcha el motor a plena carga.
- Ajustar el potenciómetro de par (M) para ir frenando el motor (n) (disminuyéndose la rpm).
- Se registra el par (M) y el número de revoluciones (n) en una tabla (12 lecturas).
- Se repite el procedimiento para una segunda lectura y poder realizar un promedio.
- Para la obtención de la potencia se aplica la siguiente fórmula:

$$P = \frac{2\pi nM}{60} (W) \quad [2]$$

- Se realiza una gráfica de Potencia (eje y) y rpm (eje x).

Para la obtención de la curva de consumo se cumplió con los siguientes pasos:

- Se realiza a unas revoluciones fijas (tomar 2500 rpm), ajustándose en el motor y se mide el tiempo en el cual se consumen 5,1 cm³ (el cual corresponde a 1 cm de descenso en la escala del tubo medidor) para un par fijado en el equipo.
- Los valores se van registrando para diferente par del motor (siempre manteniéndose en 2500 rpm), los resultados se registran en una tabla.
- Luego se realiza una tabla donde se registra la Potencia, el flujo másico $\dot{m} = Q\rho_{fluido}$ y el consumo específico (b_e) obtenido por medio de la fórmula:

$$b_e = \frac{\dot{m}}{P} \quad [3]$$

- Se realiza una gráfica de b_e (eje y) y P (eje x).

Cálculo del balance térmico

El balance energético de los motores MCI es básicamente un estudio de la primera ley de la termodinámica, que también se denomina balance de energía, balance de calor o balance térmico (Sun et al., 2019). El análisis del balance térmico es una forma eficiente de conocer el flujo de energía, permite al diseñador evaluar la variación de energía interna en función de las transferencias de energía a través de los límites como calor o trabajo y las entalpías asociadas con el flujo de masa que cruza estos límites, para luego presentar un método altamente potencial que reduzca el consumo de combustible en los motores (Luo y Sun, 2018).

El balance térmico permite que se lleve a cabo la siguiente igualdad:

Energía que entra al sistema = Energía que sale del sistema.

Desde otro punto de vista, para un proceso con flujo y estado estable se tiene el cumplimiento de la Ecuación 4.

$$\Sigma Q = \Sigma H_{entrada} - \Sigma H_{salida} \quad [4]$$

Donde:

ΣQ : sumatoria de calor evacuado al ambiente

ΣH_{salida} : sumatoria de entalpías que salen del sistema

$\Sigma H_{entrada}$: sumatoria de entalpías que entran al sistema

Lo que significa es que la suma de los calores que cruzan el sistema es igual a la diferencia entre la suma de entalpías que ingresan al sistema y la suma de entalpías que salen del sistema (Llanes Cedeño et al., 2018). El cambio de entalpía, por su parte, es una medida de la cantidad de energía absorbida o entregada en un sistema termodinámico, es decir, es el cambio que se produce por una transformación en la que se puede recibir o aportar energía (como en el presente caso de estudio, energía mecánica), por lo que se puede considerar a la entalpía como numéricamente igual al calor intercambiado con el ambiente (Máster, 2019).

Para resolver el balance térmico, se toma en cuenta los siguientes cálculos generales.

Flujo másico de combustible

$$\dot{m}_c = \rho \frac{V}{\Delta t} \quad [5]$$

Donde:

\dot{m}_c = flujo másico de combustible [kg/s]

ρ = densidad específica de combustible [kg/m³]

V = volumen de combustible [m³] consumido en $\Delta t = 3 \text{ min}$

$\Delta t = 3 \text{ min}$, tiempo de flujo [s] se mide con un cronómetro.

Calor liberado por el combustible

$$\dot{Q}_c = \dot{m}_c \cdot PCI \quad [6]$$

Donde:

\dot{Q}_c = Calor liberado por el combustible [kW]

PCI = poder calorífico inferior del combustible [kJ/kg]

Flujo de los gases

$$\dot{m}_g = \dot{m}_{ar} + \dot{m}_{comb} \quad [7]$$

Donde:

\dot{m}_{ar} = flujo de aire [kg/s]

\dot{m}_{comb} = flujo másico de combustible [kg/s]

La eficiencia energética del sistema se determina según la Ecuación 8.

$$\eta_{energético} = \frac{P_{máx}}{\dot{Q}_c} \quad [8]$$

Donde:

$P_{máx}$ = potencia máxima del motor

\dot{Q}_c = calor liberado por el combustible

Balance exergético

La exergía se establece como el análisis de rendimiento del sistema basado en la segunda ley de la termodinámica. La exergía es la cantidad de "energía disponible" en el sistema. El análisis de exergía se utiliza para definir el tipo, la ubicación y el alcance de las pérdidas de energía en diversas partes de un motor MCI (Krishnamoorthi y Malayalamurthi, 2018). La exergía se define como la cantidad máxima de trabajo teórico útil, que se puede conseguir cuando un sistema llega al equilibrio termodinámico con su entorno. La destrucción de

exergía o las irreversibilidades van acompañadas de la generación de entropía. El objetivo principal de un análisis exergético es conceptualizar el diseño óptimo para un sistema, los parámetros de diseño y operación tienen efectos considerables en el balance de exergía durante las operaciones del motor (Karthickeyan, 2019).

Se pueden identificar tres fuentes principales de destrucción de exergía: irreversibilidades en el cilindro, irreversibilidades mecánicas y otras formas de irreversibilidad. En el cilindro se explican los efectos de la transferencia de calor de los gases a la pared del cilindro, la combustión y la viscosidad. Las irreversibilidades mecánicas son causadas por la fricción, que puede calcularse por la diferencia entre la potencia de frenado indicada. Otras irreversibilidades explican la suma de diversos procesos irreversibles, como las pérdidas de bombeo, el proceso de mezcla de aire y combustible, el estrangulamiento y la transferencia de calor desde la pared al sistema de enfriamiento (Rufino et al., 2019).

El balance de exergía se resuelve mediante la siguiente metodología

Exergía asociada al calor de combustible

$$Ex_c = \dot{m}_c PCI \quad [9]$$

Donde:

Ex_c = Exergía del combustible [kW]

PCI = poder calorífico inferior del combustible [kJ/kg]

Otra sección muy fundamental del balance exergético es el flujo de gases de escape del motor. El calor específico utilizado se determinó sobre la base de una media de los valores de los calores específicos, en las respectivas temperaturas de entrada y salida, de funcionamiento del motor.

$$\dot{Ex}_g = \dot{m}_g \left\{ C_p T_0 \left[\left(\frac{T}{T_0} \right) - 1 \right] - \ln \left(\frac{T}{T_0} \right) \right\} \quad [10]$$

Donde:

$\dot{E}x_g$ = Exergía Asociada al Flujo de Gas [kW]

\dot{m}_g = Caudal de Gas [kg/s]

C_p = Calor Específico a Presión Constante [kJ/kg K]

T_0 = Temperatura de Referencia [K]

T = Temperatura [K]

El rendimiento exergético se calcula a partir de la *Ecuación*

$$\eta_{exergética} = \frac{\sum E_{flujos\ de\ entradas} - \sum E_{flujos\ de\ salidas}}{\sum E_{flujos\ de\ entradas}} \quad [11]$$

Calor específico a presión constante

El calor específico del aire a una temperatura T (K), está dado por:

$$c_{par,T} = c_o + c_1T + c_2T^2 + c_3T^3 + c_4T^4 \quad (J/Kg.K) \quad [12]$$

Para temperatura entre 200 a 800 K.

Donde:

$$c_o = 1,0189 \times 10^3$$

$$c_1 = -1,3784 \times 10^{-1}$$

$$c_2 = 1,9843 \times 10^{-4}$$

$$c_3 = 4,2399 \times 10^{-7}$$

$$c_4 = -3,7632 \times 10^{-10}$$

El calor específico a presión constante de los gases de combustión está dado por:

$$c_{p,g,T} = c_{par,T} + \frac{f}{1+f} \theta_{cp,T} \quad (J/Kg.K) \quad [13]$$

Donde: $f = \frac{\dot{m}_{comb}}{\dot{m}_{ar}}$ [14]

$$\theta_{cp,T} = Cp_o + Cp_1T + Cp_2T^2 + Cp_3T^3 + Cp_4T^4 + Cp_5T^5 \quad [15]$$

Para temperatura entre 200 a 800 K

$$c_{p0} = -3,5949x10^2$$

$$c_{p1} = 4,5164x10^0$$

$$c_{p2} = 2,8116x10^{-3}$$

$$c_{p3} = -2,1709x10^{-5}$$

$$c_{p4} = 2,8689x10^{-8}$$

$$c_{p5} = -1,2226x10^{-11}$$

Resultados y discusión

En la Tabla 1 se refleja los resultados de las 9 mediciones de revolución y par, variables necesarias para el cálculo de la potencia y la gráfica P vs n.

Tabla 1
Valores tabulados de revolución, par y potencia

SÚPER			EXTRA			ECOPAÍS		
n (rpm)	M (Nm)	P(W)	n (rpm)	M (Nm)	P(W)	n (rpm)	M (Nm)	P(W)
3753	0,5	196,51	3808,5	0,495	197,42	3815	0,5	199,75
3671	1,03	395,96	3724	1,005	391,93	3743	1,005	393,93
3624	1,5	569,26	3650,5	1,505	575,33	3671,5	1,5	576,72
3579,5	1,995	747,81	3609	2,005	757,76	3623	2,01	762,59
3528	2,505	925,48	3559,5	2,5	931,87	3621	2,5	947,98
3501,5	3	1100,03	3342	3	1049,92	3554	3,005	1118,38
3199	3,505	1174,17	3121,5	3,495	1142,46	3224	3,505	1183,35
2474,5	4,005	1037,81	2412,5	4,005	1011,81	2340	4,01	982,63
2333	4,5	1099,40	2169	4,5	1022,12	2067,5	4,505	975,37

La Figura 5 indica la potencia en función de la velocidad de giro del motor, se observa que a medida que la velocidad de giro aumenta, la potencia generada también aumenta pero solo hasta alcanzar su potencia máxima. La máxima potencia generada con el uso de la gasolina Súper es 1174,17 W que corresponde a una velocidad de giro del motor de 3199 rpm, la máxima potencia generada con el uso de la gasolina Extra es 1142,46 W que corresponde a una velocidad de giro del motor de 3121,5 rpm y la máxima potencia generada con el uso de la gasolina Ecopais es 1183,35 W que corresponde a una velocidad de giro del motor de 3224 rpm. En resumen se obtiene que por debajo de 3000 rpm no hay diferencias en el comportamiento de la potencia, no siendo así entre 3000 – 3600 rpm donde la gasolina Ecopais y Súper presentan los mejores resultados. Estos resultados son compatibles con el trabajo de Quimbita y Guallichico (2017), donde se realizaron tres pruebas de potencia con cada gasolina y se obtuvieron sus promedios para su análisis, los cuales fueron para la gasolina Súper de 69,33 kW (92,97 HP), para la gasolina Extra de 67,96 kW (91,13 HP) y

para la gasolina Ecopaís de 69,59 kW (93,33 HP), notándose que se obtiene la misma tendencia de comportamiento con el estudio desarrollado.

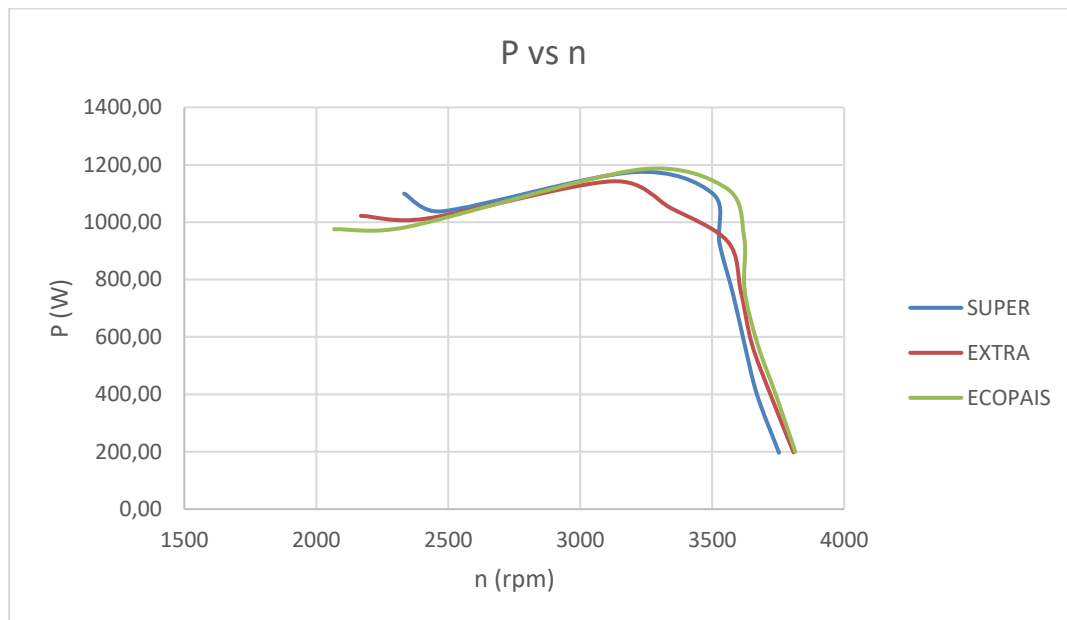


Figura 5 Curvas Potencia vs revolución

En la Tabla 2 se refleja los resultados de las 6 mediciones de potencia y flujo másico, parámetros necesarios para el cálculo del consumo específico (be).

Tabla 2

Valores tabulados de potencia, flujo másico y consumo específico

SÚPER			EXTRA			ECOPAÍS		
P(W)	m(kg/h)	be (g/kwh)	P(W)	m(kg/h)	be (g/kwh)	P(W)	m(kg/h)	be (g/kwh)
18,33	0,096	0,0053	36,652	0,1777	0,0048	15,7080	0,1132	0,0072
130,90	0,220	0,0017	130,900	0,1891	0,0014	130,8997	0,1817	0,0014
261,80	0,254	0,0010	264,417	0,2824	0,0011	264,4174	0,2938	0,0011
562,87	0,277	0,0005	534,071	0,3222	0,0006	526,2168	0,3003	0,0006
748,75	0,373	0,0005	785,398	0,3836	0,0005	785,3982	0,4045	0,0005
1047,20	0,890	0,0008	1047,198	0,7808	0,0007	1047,1976	0,5567	0,0005

La Figura 6 indica el consumo específico de combustible en función de la potencia generada; cuando la potencia aumenta el consumo específico del combustible disminuye hasta aproximadamente los 600 W, a partir de este valor se empieza a experimentar un ligero incremento, los mayores consumos se producen a bajas revoluciones. Este resultado es

compatible con el obtenido por Ramírez y Arcila (2017), donde se realizaron pruebas dentro de un régimen de operación desde 1100 rpm hasta 3600 rpm, desde 1100 rpm hasta 2000 rpm el consumo específico del combustible fue disminuyendo hasta alcanzar su mínimo valor, desde ahí en adelante este fue creciendo en función del aumento de la velocidad de giro del motor. En resumen, se puede concluir, que el comportamiento del consumo específico para las tres gasolinas no es significativo, al igual que resultados obtenidos por el estudio de Quimbita y Guallichico (2017), donde se observa un consumo específico del combustible de 47,44 g/kWh para gasolina Súper, 43,17 g/kWh para gasolina Extra y 49,96 g/kWh para gasolina Ecopaís.

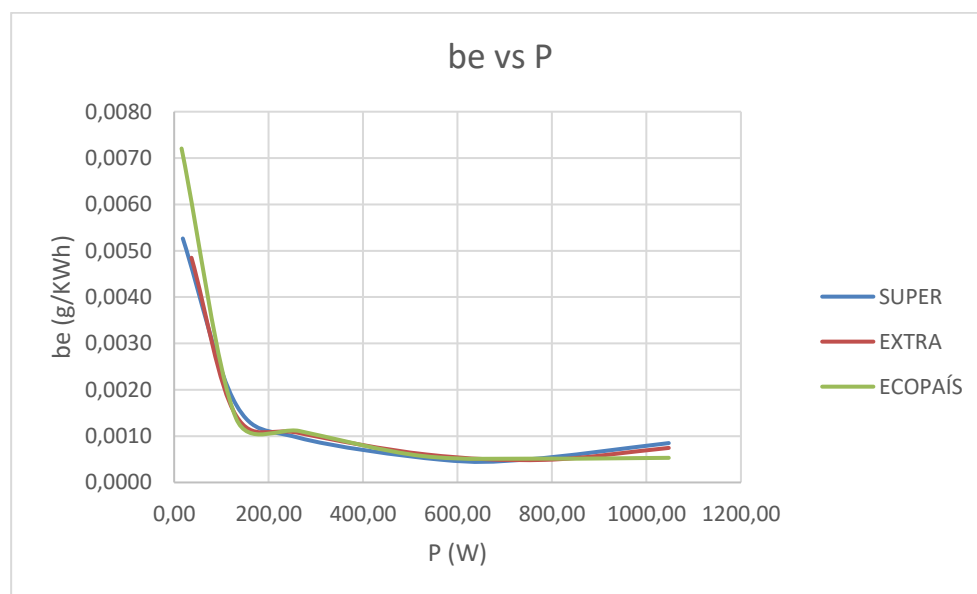


Figura 6 Curvas consumo específico vs potencia

En la Tabla 3 se refleja los resultados de las mediciones necesarias para el cálculo del balance térmico del MCI a máxima potencia realizadas a las gasolinas Súper, Extra y Ecopaís.

Tabla 3

Valores tabulados de la parte experimental a potencia máxima

Gasolina Súper										
M_{máx} (Nm)	P_{máx} (W)	Consumo (m³)	V (m³/s)	ρ_c (kg/m³)	\dot{m}_c (kg/s)	\dot{m}_{aire} (kg/s)	\dot{m}_{gas} (kg/s)	\bar{T}_e (°C)	\bar{T}_s (°C)	PCI kJ/kg
3,505	1174,17	53,55	2,97E-07	722	0,0002148	0,002071	0,002286	22,77	543	48345,66
Gasolina Extra										
3,495	1142,46	58,65	3,26E-07	723	0,0002356	0,002046	0,002282	23,72	543,5	45124,76
Gasolina Ecopaís										
3,505	1183,35	61,2	3,40E-07	749	0,0002547	0,002060	0,002315	23,77	541,5	44739,17

En la Tabla 4 se indican las variables obtenidas al aplicar la metodología descrita en el apartado del método.

Tabla 4

Resultados de rendimiento energético y exergético calculados a potencia máxima

Gasolina Súper						
P_{máx}(W)	\dot{Q}_c (KW)	η_{ener} %	Ex_g (KW)	Ex_c(KW)	Ex_k(KW)	η_{exer} %
1174,17	10,38	11,31	0,64	10,38	3,63	58,81
Gasolina Extra						
1142,46	10,63	10,75	0,65	10,63	3,72	58,89
Gasolina Ecopaís						
1183,35	11,39	10,39	0,66	11,39	3,99	59,19

Nota: la exergía por transferencia de calor por conducción y convección se ha designado como Ex_k , estimando en un 35% de Ex_c , según (Li et al., 2018).

Tal como se indica en la Tabla 4, la eficiencia energética de la gasolina Súper es de 11,31 % y la eficiencia exergética es de 58,81 %; gasolina Extra 10,75 % y 58,89 %; gasolina Ecopaís 10,39 % y 59,19 % respectivamente, esto es debido a que hay una cantidad de exergía que se está destruyendo en los gases de escape y que podría ser aprovechada para generar trabajo. Tener una eficiencia exergética mayor a una eficiencia energética, quiere decir que hay un potencial exergético de mejoramiento (PEM) mediante el cual se puede aprovechar parte de esa exergía que se está destruyendo y convertirla en trabajo, logrando así aumentar la eficiencia térmica (Torres, Lugo, y Lugo, 2016).

Los resultados obtenidos son compatibles con el trabajo de Torres et al., (2016), donde se obtuvo una eficiencia exergética de 14,77 % que es superior a la eficiencia energética de 12,79 %, concluyendo que esta diferencia se origina debido al aumento de las velocidades de giro del motor en un 43,19 %.

Por otra parte según Llerena (2018), al principio de su estudio, obtuvo una eficiencia energética del 39 % y una eficiencia exergética del 79 %, luego se presenta una eficiencia exergética reducida a 56 % debido al uso de los gases de escape que salen de la turbina para generar vapor (cogeneración), logrando así aumentar la eficiencia energética a un 67 %.

Para una mejor visualización de los resultados de la parte energética se presentan los valores de flujo de energía en la Tabla 5, así como también las Figuras 7, 8 y 9, las cuales representan los diagramas de Sankey para las tres tipos de gasolinas utilizadas Súper, Extra y Ecopaís. Estos diagramas representan la distribución cuantitativa de los flujos de energía que entran y salen del sistema, así como las pérdidas por transferencia de calor y emisión de gases de escape.

Tabla 5
Valores de flujo de energía

	Gasolina	Súper	Extra	Ecopaís
Flujo energético (KW)	Combustible	10,38	10,63	11,39
	Gases de escape	5,58	5,77	6,22
	Pérdida por convección	3,63	3,72	3,99
	Potencia de eje	1,17	1,14	1,18

Con los resultados obtenidos se puede concluir que la cantidad de pérdida de energía en el motor estudiado bajo el consumo de gasolina Súper es 9,21 kW (88,73 %) como se indica en la Figura 7, con lo cual se determinó que el motor tiene una eficiencia energética de 11,31 % y una eficiencia exergética de 58,81 %.



Figura 7 Diagrama de Sankey-Gasolina Súper

Por otro lado, la cantidad de pérdida de energía en el motor estudiado bajo el consumo de gasolina Extra es 9,49 kW (89,28 %) como se indica en la Figura 8, con lo cual se determinó que el motor tiene una eficiencia energética de 10,75 % y una eficiencia exergética de 58,89 %.

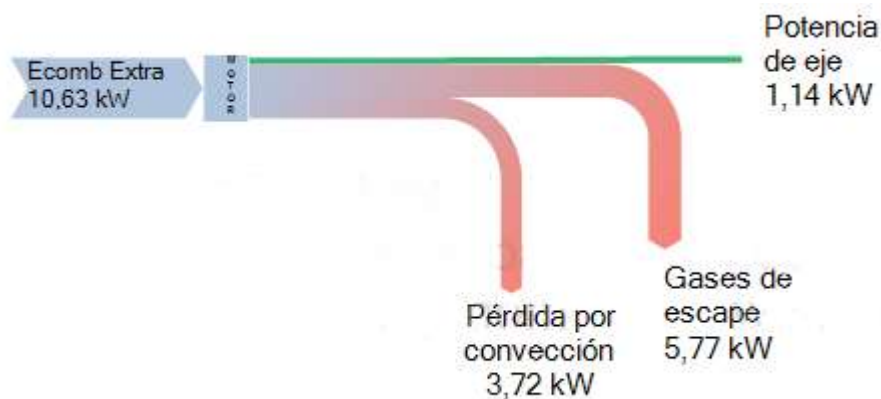


Figura 8 Diagrama de Sankey-Gasolina Extra

Por último, la cantidad de pérdida de energía en el motor estudiado bajo el consumo de gasolina Ecopais es 10,21 kW (89,64 %) como se indica en la Figura 9, con lo cual se determinó que el motor tiene una eficiencia energética de 10,39 % y una eficiencia exergética de 59,19 %.

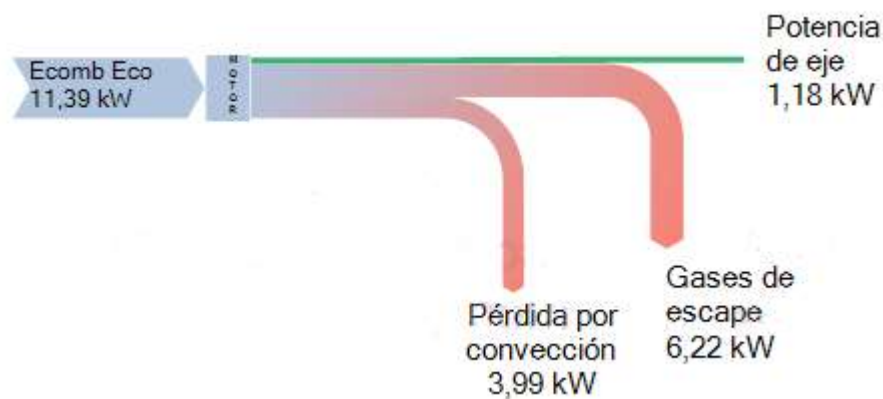


Figura 9 Diagrama de Sankey-Gasolina Ecopaís

Con los resultados presentados se puede concluir que hay variaciones en el rendimiento energético y exergético en el motor estudiado al utilizar las tres gasolinas, se obtiene una mejor eficiencia energética de 11,31 % al usar gasolina Súper, resultados que son compatibles con Mecánico et al., (2017), donde se obtuvo una eficiencia energética de 19,19 % para la gasolina Súper. También se observa que la mayor pérdida de energía en el motor se presenta con el uso de la gasolina Ecopaís de 10,21 kW (89,64 %), esta pérdida de energía se da en la emisión de los gases de escape y la transferencia de calor por conducción y convección, a la vez representa un alto potencial exergético de mejoramiento el cual puede ser aprovechado para generar trabajo y a la vez lograr aumentar la eficiencia energética del motor al usar la gasolina Ecopaís, estos resultados son compatibles con los obtenidos por Valle, Batista, Tuna, Vorobieff, y Silveira (2015), donde se obtuvo pérdidas de energía igual a 8,57 kW (66,35 %) de un total de 12,92 kW (100 %).

Conclusiones

Luego de realizar la evaluación energética y exergética de un motor de gasolina CT 150 de 1 cilindro y 4 tiempos bajo diferentes gasolinas comercializadas en el Ecuador, se obtiene las siguientes conclusiones:

1. El motor estático que fue estudiado bajo el consumo de diferentes gasolinas, presenta una eficiencia energética de 11,31 % para gasolina Súper, 10,75 % para gasolina Extra y 10,39 % para gasolina Ecopaís. En lo relacionado a la eficiencia exergética se determinó un 58,81 % para la gasolina Súper, 58,89 % para la gasolina Extra y un 59,19 % para la gasolina Ecopaís. La eficiencia exérgica es mucho mayor a la eficiencia energética en cada uno de los casos, existiendo un potencial exergético de mejoramiento (PEM) que puede aprovechar la exergía que se está destruyendo para convertirla en trabajo y así lograr aumentar la eficiencia energética.
2. La potencia máxima del motor es directamente proporcional a la eficiencia energética, por lo tanto, se puede concluir que la mejor eficiencia energética del motor que se obtuvo es bajo el consumo de la gasolina Súper con una potencia máxima generada de 1183,35 W a 3224 rpm y una eficiencia energética de 11,31 %.
3. Por otra parte, se puede concluir que existe un mayor potencial exergético de mejoramiento en el motor bajo el consumo de gasolina Ecopaís, ya que presenta un flujo energético desperdiciado de 10,21 kW (89,64 %), por parte de los gases de escape y las pérdidas por transferencia de calor por conducción y convección, parte de esta exergía puede ser aprovechada para la generación de trabajo y así lograr aumentar la eficiencia energética del motor bajo el uso de este combustible.
4. A partir de la metodología aplicada se determinaron eficiencias energéticas en el rango de 10,39 % a 11,31 %, las cuales son muy bajas en comparación a las eficiencias

térmicas reales de un motor de combustión interna las cuales oscilan entre el 25 % al 30 %, la eficiencia real es mayor ya que se obtiene una mejor combustión y una menor pérdida de exergía.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Antonio, L., & Chifla, M. (2016). *UNIVERSIDAD DE GUAYAQUIL Trabajo de titulación AUTORES: Guayaquil - Ecuador.*
- Balance energético. (2017). Balance Energético Nacional 2017.
- Beltrán, D. A. C. (2017). Aporte Santiaguino. *Aporte Santiaguino*, 10(2), 7–20. Retrieved from http://revistas.unasam.edu.pe/index.php/AS_V10N2/article/view/172
- Cabezas, E. D., & Andrade, D. (2018). *Introducción a la metodología de la investigación científica.*
- Dolatabadi, N., Forder, M., Morris, N., Rahmani, R., Rahnejat, H., & Howell-Smith, S. (2019). Influence of advanced cylinder coatings on vehicular fuel economy and emissions in piston compression ring conjunction. *Applied Energy*, (October), 114129. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114129>
- Erdiwansyah, Mamat, R., Sani, M. S. M., Sudhakar, K., Kadarohman, A., & Sardjono, R. E. (2019). An overview of Higher alcohol and biodiesel as alternative fuels in engines. *Energy Reports*, 5, 467–479. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.04.009>
- Federal, U., Ufes, S., Tecnológico, C., & Mecânica, D. D. E. (2015). Balanço Energético e Exergético de uma Pequena Central Termelétrica equipada com um Motor de Combustão Interna a Diesel Balanço Energético e Exergético de uma Pequena Central Termelétrica equipada com um Motor de Combustão Interna a Diesel.
- Karthickeyan, V. (2019). Effect of combustion chamber bowl geometry modification on engine performance, combustion and emission characteristics of biodiesel fuelled diesel engine with its energy and exergy analysis. *Energy*, 176, 830–852. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.04.012>
- Krishnamoorthi, M., & Malayalamurthi, R. (2018). Availability analysis, performance, combustion and emission behavior of bael oil - diesel - diethyl ether blends in a variable

compression ratio diesel engine. *Renewable Energy*, 119, 235–252.

<https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.12.015>

Li, Y., Jia, M., Kokjohn, S. L., Chang, Y., & Reitz, R. D. (2018). Comprehensive analysis of exergy destruction sources in different engine combustion regimes. *Energy*, 149, 697–708. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.02.081>

Llanes Cedeño, E. A., Carguachi-Caizatoa, J. B., & Rocha-Hoyos, J. C. (2018). Evaluación energética y exergética en un motor de combustión interna ciclo Otto de 1.6L. *Enfoque UTE*, 9(4), 221–232. <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.v9n4.365>

LLerena, O. R. (2018). Análisis energético, exergético y económico de un sistema de cogeneración: Caso para una planta azucarera de San Pablo. *Ingenius*, (19), 29–39. <https://doi.org/10.17163/ings.n19.2018.03>

Luo, Q. he, & Sun, B. gang. (2018). Experiments on the effect of engine speed, load, equivalence ratio, spark timing and coolant temperature on the energy balance of a turbocharged hydrogen engine. *Energy Conversion and Management*, 162(September 2017), 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.12.051>

Máster, T. F. De. (2019). LA ENSEÑANZA DE LA TRANSFERENCIA DE.

Mofijur, M., Rasul, M. G., Hyde, J., & Bhuyia, M. M. K. (2015). Role of Biofuels on IC Engines Emission Reduction. *Energy Procedia*, 75, 886–892. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.211>

Morgan, R., Dong, G., Panesar, A., & Heikal, M. (2016). A comparative study between a Rankine cycle and a novel intra-cycle based waste heat recovery concepts applied to an internal combustion engine. *Applied Energy*, 174, 108–117. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.04.026>

Quimbita, A., & Guallichico, E. (2017). DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL ENERGÉTICO Y MECÁNICO DEL MOTOR MAZDA F2 AL UTILIZAR LOS TIPOS

DE GASOLINA COMERCIAL EMPLEADOS EN EL ECUADOR.

- Ramírez, A. J. D., & Arcila, A. A. (2017). VALIDACIÓN EXPERIMENTAL DE LA RELACIÓN DE COMPRESIÓN PARA VARIOS COMBUSTIBLES A UTILIZAR EN UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA JUAN. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Rufino, C. H., de Lima, A. J. T. B., Mattos, A. P., Allah, F. U. M., Bernal, J. L. L., Ferreira, J. V., & Gallo, W. L. R. (2019). Exergetic analysis of a spark ignition engine fuelled with ethanol. *Energy Conversion and Management*, 192(December 2018), 20–29. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.04.035>
- Sun, P., Liu, Z., Yu, X., Yao, C., Guo, Z., & Yang, S. (2019). Experimental study on heat and exergy balance of a dual-fuel combined injection engine with hydrogen and gasoline. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(39), 22301–22315. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.06.149>
- Tamilselvan, P., Nallusamy, N., & Rajkumar, S. (2017). A comprehensive review on performance, combustion and emission characteristics of biodiesel fuelled diesel engines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79(November 2016), 1134–1159. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.176>
- Torres, E. V., Lugo, R., & Lugo, H. (2016). Evaluación del desempeño de un motor de gasolina mediante el análisis energético y exerético.
- Valle, A. E., Batista, M. R., Tuna, C. E., Vorobieff, C. L., & Silveira, J. L. (2015). Análisis Energético , Exerético y Ecológico Aplicado en un Motor de Combustión Interna de Pequeño Porte Accionado con Biogas. *The Xi Latin-American Congress Electricity Generation and Transmission - Clagtee 2015*, (November).
- Venkata Sundar Rao, K., Kurbet, S. N., & Kuppast, V. V. (2018). A Review on Performance of the IC Engine Using Alternative Fuels. *Materials Today: Proceedings*, 5(1), 1989–

1996. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.303>

Wang, Q., Sun, W., Guo, L., Fan, L., Cheng, P., Zhang, H., & Sun, Y. (2019). Effects of EGR and combustion phasing on the combustion and emission characteristic of direct-injection CI engine fueled with n-butanol/diesel. *Energy Procedia*, 160(2018), 364–371.

<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.02.169>

Wang, X., Sun, B. gang, & Luo, Q. he. (2019). Energy and exergy analysis of a turbocharged hydrogen internal combustion engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, 5551–5563. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.10.047>