



## Inspección del uso de la exergía en el marco de la sostenibilidad: Un caso aplicado a la combustión interna

### Inspection of Exergy usage under a Sustainability Framework: A Case of Application for Internal Combustion

Mariana Bencid<sup>1</sup>, José Delgado<sup>1</sup>, Dafni Mora<sup>1</sup>, Miguel Alejandro Chen Austin<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Grupo de investigación Energética y Confort en Edificaciones Bioclimáticas (ECEB), Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá

\*Autor de correspondencia: [miguel.chen@utp.ac.pa](mailto:miguel.chen@utp.ac.pa)

**RESUMEN**— Debido a la crisis climática que se vive hoy en día a nivel mundial y con el objetivo de proponer sistemas más eficientes y sostenibles que contribuyan al cumplimiento de los ODS planteados por la ONU, este artículo busca proponer un marco de referencia basado en análisis exergéticos para evaluar la eficiencia y nivel de sostenibilidad de un sistema, específicamente el caso de motores de combustión interna (MCI). A modo de contexto, se provee un estado del arte sobre la exergía y principales aportes recientes para el mejoramiento de los MCI basados en exergía. Se definen las ecuaciones necesarias para realizar un análisis exergético para el caso de un ciclo Diesel, considerando los procesos de combustión y transferencia de calor como fuentes de generación de entropía. De igual manera, se estableció un indicador de sostenibilidad a partir del balance exergético para un sistema. Se aplicaron estas ecuaciones para un caso de estudio de un MCI y se realizaron pruebas con varios tipos de combustibles a modo de comparar su eficiencia, de los cuales el etano ( $C_2H_6$ ) resultó ser el combustible más eficiente y con mayor nivel de sostenibilidad comparado con los demás. Sin embargo, se obtuvo que las reacciones químicas en general, representan un gran porcentaje de pérdidas en la calidad, así como una amenaza a la sostenibilidad del sistema.

**Palabras clave**— Combustión, eficiencia, exergía, irreversibilidad, sostenibilidad.

**ABSTRACT**— Due to the climate crisis that is being experienced today worldwide and to propose more efficient and sustainable systems that contribute to the fulfillment of the SDGs proposed by the UN, this article seeks to propose a reference framework based on exergetic analysis for evaluating the efficiency and level of sustainability of a system, specifically the case of internal combustion engines (ICM). As a context, state of the art on exergy and main recent contributions for improving exergy-based ICMs are provided. The necessary equations are defined to carry out an exergy analysis for a Diesel cycle, considering the combustion and heat transfer processes as sources of entropy generation. Similarly, a sustainability indicator was established based on the exergy balance for a system. These equations were applied to a case study of an ICM, and tests were carried out with various types of fuels to compare their efficiency. Ethane ( $C_2H_6$ ) turned out to be the most efficient fuel and with the highest sustainability level compared to others. However, it was found that chemical reactions, in general, represent a large percentage of quality losses, as well as a threat to the sustainability of the system.

**Keywords**— Combustion, efficiency, exergy, irreversibility, sustainability.

#### 1. Introducción

Desde el desarrollo de los primeros motores de combustión interna en la década de 1860 [1], el ser humano ha estudiado incansablemente distintos mecanismos de mejora para aumentar la eficiencia de dichos motores. Sin embargo, durante muchos años, estos estudios estuvieron basados en la primera ley de la termodinámica, que se limita a evaluar conservación y cantidad de energía, sin analizar fuera de las fronteras de un sistema, de manera que este es un enfoque que no se

involucra con las características ambientales que rodean al sistema y que por ende se ven afectadas por el mismo.

No obstante, debido a la necesidad de contribuir a la solución de distintos problemas ambientales a los cuales nos enfrentamos actualmente, se han buscado otras maneras de poder medir y evaluar distintos procesos y sistemas (entre los cuales se encuentran los sistemas termodinámicos) para así poder localizar aquellos factores que amenazan la sostenibilidad y eficiencia de un sistema y de esta manera estudiar oportunidades de

**Citación:** M. Bencid, J. Delgado, D. Mora y M. Chen, “Inspección del uso de la exergía en el marco de la sostenibilidad: Un caso aplicado a la combustión interna”, *Revista de I+D Tecnológico*, vol. 17, no. 1, pp. (no modificar), 2021.

**Tipo de artículo:** Original. **Recibido:** 22 de enero de 2021. **Recibido con correcciones:** 22 de enero de 2021. **Aceptado:** 10 de febrero de 2021.

**DOI:** 10.33412/idt.v17.1.3026

**Copyright:** 2021 M. Bencid, J. Delgado, D. Mora y M. Chen. This is an open access article under the CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).

mejora que estén alineadas con los objetivos de desarrollo sostenible propuestos por la ONU.

Estos dos conceptos, sostenibilidad y eficiencia se unen en el concepto de exergía que, a través de los principios de la primera y segunda ley de la termodinámica, permite realizar un análisis profundo sobre las irreversibilidades de los procesos que disminuyen la sostenibilidad y eficiencia de un sistema. Para este caso de estudio, un MCI.

### 1.1 Aplicaciones y avances de la exergía

No fue sino hasta el siglo XX que autores como Darrieus (1931), Hausser & Hegelman (1950), Frieder (1953), Lange & Schmidt (1953), Grassmann & Kammerer, Nesselman (1955) Bock y Mattarolo (1956), habiendo evaluado las definiciones de eficiencia según la primera ley de la termodinámica, proponen que un nuevo parámetro de desempeño basado en la segunda ley debe ser utilizado [2].

Estas publicaciones sentaron las bases para múltiples estudios entre los cuales resalta el artículo "Disponibilidad e irreversibilidad" publicado por Joseph Keenan en 1951, el cual está basado en los aportes de Gibbs, quien a través de sus obras implementó la utilidad de los gráficos para representar las propiedades termodinámicas de las sustancias mediante superficies y explicó un método que relaciona la energía, entropía y volumen como superficie. En su artículo, Keenan profundiza estos estudios deduciendo expresiones para un trabajo máximo basándose en coeficientes de rendimiento, irreversibilidad cuantificable y disponibilidad de varios tipos de sistemas. Este artículo y otros trabajos de Keenan proporcionaron ejemplos y métodos para ampliar los hallazgos de Gibbs en el ámbito termodinámico y permitieron que el análisis de la segunda ley se aplicara a sistemas reales [3].

Poco después de esta publicación, el físico alemán Kant publicó un artículo introduciendo el término exergía para connotar el trabajo reversible realizado de un proceso cíclico. Kant creó el término "exergía" combinando el griego *exo* que significa fuera y energía, en alemán "*exergie*". Años después, su compatriota, D. Baehr, definió la exergía como la energía total convertible que de igual manera puede transformarse en otra forma de energía. Después de esto, el término exergía ganó aceptación científica y se volvió un término estándar [2].

Al combinar los principios tanto de la primera como la segunda ley de la termodinámica, la exergía puede ser utilizada como indicador de eficiencia ya que permite

localizar las irreversibilidades dentro del sistema que causan degradación en la energía y cuantificar de esa manera, el remanente de energía disponible para convertirse en trabajo útil. Esto se traduce en una evaluación profunda de la cantidad y calidad de la energía, razón por la cual, autores como Gong [4] establecen que para mejorar la eficiencia de procesos de conversión de energía es necesario aplicar los conceptos de exergía y análisis exergético. Sin embargo, para lograr esto, es necesario establecer de manera precisa las fronteras de nuestro sistema y un estado de referencia que nos indiquen los parámetros bajo los cuales se alcanza el máximo trabajo útil posible [5]. Muy comúnmente, el estado de referencia está definido por las condiciones ambientales, razón por la cual han surgido definiciones recientes como la propuesta por Lucía, que define la exergía como "la energía disponible para conversión desde las propiedades definidas de un reservorio a unas propiedades específicas, usualmente las del ambiente" [6]. Otra definición ampliamente aceptada es aquella publicada por Boroumandjazi en la que explica la exergía como "la cantidad máxima de trabajo que puede ser producida por un sistema, un flujo de masa o energía en equilibrio con sus alrededores" [7].

Añadido a las ventajas previamente mencionadas, el concepto de exergía como indicador de calidad de energía cobra vital importancia al ser relacionado específicamente con la crisis climática mundial que se vive actualmente ya que, en contraste con los métodos convencionales de evaluación de desempeño, un análisis exergético vincula las irreversibilidades de los procesos y su impacto en la degradación de energía relacionada con el ambiente. De esta manera la exergía de un sistema no sólo es aplicable para la optimización de procesos sino que a la vez funciona como un indicador de sostenibilidad [6]. Por estas razones, los análisis exergéticos se vuelven claves al estudiar distintos sistemas termodinámicos, entre los cuales resaltan los motores de combustión interna (MCI), especialmente porque el uso de combustibles fósiles es la primera fuente de emisión de gases de efecto invernadero como el CO<sub>2</sub> [8]. Esto ha llevado a numerosos científicos a realizar estudios sobre este tipo de motores y su desempeño utilizando la primera y segunda ley de la termodinámica, así como el concepto de exergía.

### 1.2 Aplicaciones y avances de la exergía en MCI

A continuación, un listado de los avances en orden cronológico sobre los principales estudios realizados a motores de combustión interna, aplicando la segunda ley

de termodinámica y conceptos de exergía, subdivididos en dos períodos: primero avances (1957-2000) y avances recientes (2000-2015).

Primeros avances (1964-2000). Patterson & Van Wylen (1964): Realizaron un trabajo pionero, describiendo la simulación del ciclo termodinámico con motor encendido por chispa. Este incluía los valores de entropía que determinaron la exergía de tiempo de compresión y expansión. Además, como avance importante, fueron capaces de aislar la destrucción de exergía asociada con el proceso de transferencia de calor y combustión [9].

Primus, utilizando la segunda ley, evaluó mejoras del turbocompresor para mejorar la refrigeración del aire. Mostró que a medida que la combustión disminuye, la destrucción de exergía aumenta debido a maximizar el volumen y minimizar la mezcla [10].

Flynn, presentó un análisis basado igualmente en la segunda ley, describiendo los procesos dentro de un motor Diesel en comparación con el análisis tradicional de la primera ley. Utilizaron la conservación de masa y energía para sus cálculos y las relaciones combustible-aire para sus simulaciones [10].

Alkidas, su investigación fue diferente a los demás, aplicando la primera y segunda ley a un sólo cilindro del motor Diesel de cámara abierta. Como resultado obtuvo que la segunda ley fue más eficiente y concluyó que la mitad de la energía de los gases de escape podrían utilizarse para la producción de trabajo [11].

Datta & Som, desarrollaron un modelo teórico sobre el análisis de exergía, basado en la transferencia y disponibilidad de flujo en el proceso de combustión para evaluar la irreversibilidad. Utilizando las dos fases del motor fue capaz de calcular numéricamente los campos de velocidad, temperatura y concentración en el proceso de combustión [12].

Avances recientes (2000-2015). Rakopoulos & Giakoumis, basaron sus estudios en el rendimiento de energía y exergía de un motor Diesel turboalimentado con un análisis computacional. Incluyen características novedosas para la simulación de este modelo, como separar los procesos de cada cilindro y la fricción mecánica del combustible. Concluyeron que, a diferencia de la energía, la exergía es destruida dentro del sistema, y esta destrucción, conocida como irreversibilidad, puede conducir a un pobre rendimiento del motor [9].

Jafarmadar, realizó el análisis en la cámara principal de un motor Diesel de inyección directa para dos cargas con motor de par de máxima velocidad. Su trabajo demostró que el modelado multidimensional puede

utilizarse en cámaras de geometría completa para obtener información sobre los campos de flujo en la combustión, basándose en la segunda ley [13]. Abassi, basó su investigación en el efecto que causa variar el diámetro del orificio de la boquilla de un motor Diesel de inyección directa. Concluyó que el maximizar el diámetro, conduce a un aumento en la exergía de trabajo, así como la pérdida de disponibilidad y disminución en irreversibilidad de combustión y disponibilidad de escape [14]. Ozkan, utilizando un motor de cuatro tiempos, se hizo funcionar con diferentes presiones de inyección. El estudio demostró que, al maximizar presión de inyección, aumenta la eficiencia de exergía en un MCI [5].

Debido a la inminente necesidad de aplicar conceptos más eficientes a la hora de evaluar el desempeño y sobre todo la sostenibilidad de un sistema, este artículo presenta la formulación y aplicación de la eficiencia exergética y su aplicación para motores de combustión interna, con el propósito de hacer un análisis profundo de las irreversibilidades y degradación de energía de los procesos que ocurren en estos motores. De esta manera, proponer soluciones prácticas para la mejora de la eficiencia del motor, que a su vez tomen en consideración el impacto ambiental que estos acarrearán.

## 2. Materiales y métodos

Para iniciar un análisis exergético que permita estudiar correctamente el rendimiento de un sistema, es necesario definir las ecuaciones que expresen a través de los principios de la segunda ley de la termodinámica, la máxima eficiencia exergética posible de alcanzar (figura 1).

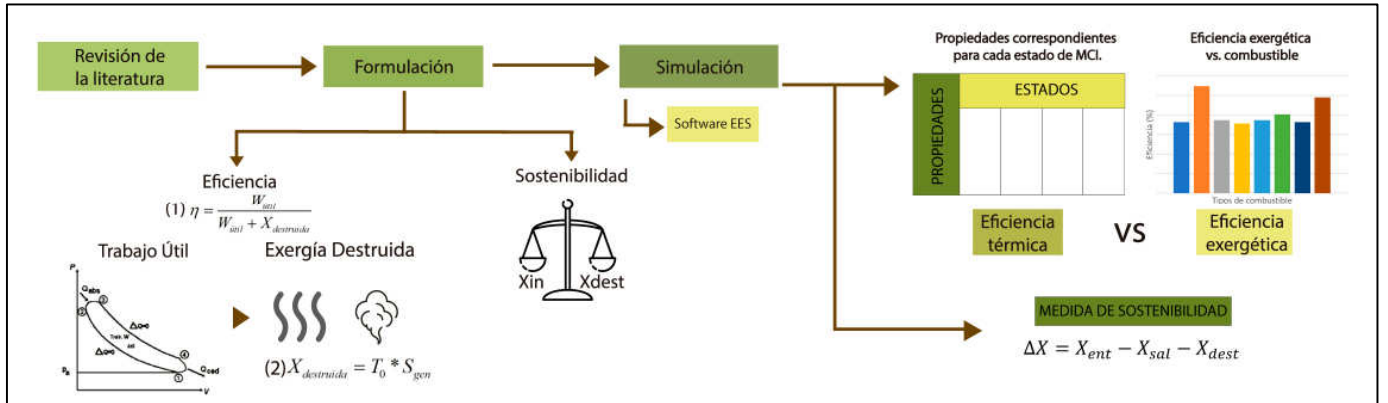
### 2.1 Definición de la eficiencia exergética

Teniendo en cuenta que la eficiencia se define como la razón entre el valor de salida deseada y la entrada requerida, es posible expresar la eficiencia  $\eta$  de un proceso en términos de exergía de la siguiente manera:

$$\eta = 1 - \frac{\text{Exergía destruida}}{\text{Exergía suministrada}} \quad (1)$$

Como se puede observar de la ecuación (1), la eficiencia máxima se obtiene cuando no se destruye exergía (proceso ideal sin irreversibilidades).

Una vez conocida la definición de eficiencia a partir de la segunda ley de la termodinámica, corresponde formular las ecuaciones que representen la exergía asociada con las distintas formas de energía capaces de realizar trabajo.



**Figura 1.** Representación esquemática de la metodología utilizada para el estudio.

Al abordar la exergía transferida desde o hacia el sistema por calor, el análisis es diferente, puesto que el calor representa energía de menor calidad y por esta razón, no tiene la capacidad de convertirse completamente en trabajo. Para este caso, la exergía transferida por calor ( $X_{calor}$ ) corresponde a la ecuación (2):

$$X_{calor} = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) Q \quad (2)$$

Donde  $T$  representa la temperatura del sistema,  $Q$  el calor transferido y el subíndice 0 representa el estado muerto o estado en equilibrio con el ambiente ( $T_0 \sim 30^\circ\text{C}$  y  $P_0 \sim 1\text{ atm}$ ). Aquellos estados sin subíndice se refieren a los estados especificados inicialmente para el proceso.

Entonces, a través de un balance de energía y el uso del concepto de entropía, se deduce que un sistema cerrado que experimenta un proceso reversible que involucre transferencia de calor y que alcanza el equilibrio con el punto de referencia, entrega un trabajo útil total ( $W$ ) representado por la ecuación (3):

$$W = (U - U_0) + P_0(V - V_0) - T_0(S - S_0) \quad (3)$$

Donde  $U$  se refiere a la energía interna y  $S$  a la entropía dada en cada estado correspondiente.  $P$ ,  $V$  y  $T$ , corresponden a la presión, volumen y temperatura, respectivamente. Para un sistema que inicialmente posee energía cinética y potencial, la exergía transferida ( $X$ ) puede representarse mediante la ecuación (4), donde:

$$X = (U - U_0) + P_0(V - V_0) - T_0(S - S_0) + m\frac{v^2}{2} + mgz \quad (4)$$

De lo anterior, la ecuación (4) puede ser escrita de forma intensiva como en la ecuación (5):

$$\phi = (e - e_0) + P_0(v - v_0) - T_0(s - s_0) \quad (5)$$

donde  $e$  representa el conjunto de formas de energía que incluye energía interna, cinética y potencial.

Por lo tanto, el cambio de exergía entre dos estados, el cual representa el máximo trabajo posible (o mínimo requerido en caso de resultar positivo) en un proceso reversible ( $W_{rev}$ ) está dado por la ecuación (6):

$$\Delta\phi = (e_2 - e_1) + P_0(v_2 - v_1) - T_0(s_2 - s_1) = W_{rev} \quad (6)$$

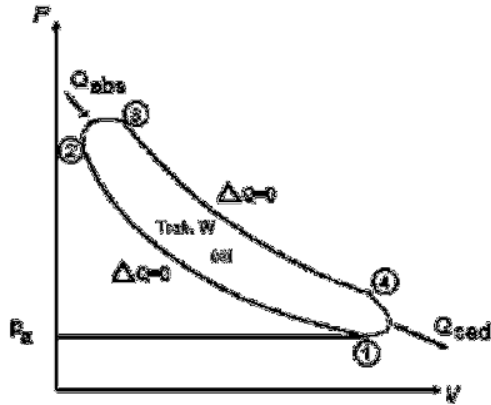
Así, tratándose de motores de combustión interna, en los cuales, la salida deseada es el trabajo neto producido por el motor y tomando en cuenta que la exergía suministrada es igual a la suma de las exergías recuperada y destruida, es posible escribir la ecuación (1) como en la ecuación (7):

$$\eta = \frac{W_{util}}{W_{util} + \sum X_{destruida}} \quad (7)$$

## 2.2 Análisis exérgico para MCI

En la figura 1 se muestran los procesos internos de un MCI, donde el proceso 1-2 corresponde a una compresión adiabática, lo que quiere decir que, para este proceso, la exergía será igual al trabajo realizado por el cambio de volumen. En el proceso 2-3, como consecuencia de la transferencia de calor al sistema, ocurre la combustión, reacción química que, al ser un proceso irreversible, produce destrucción de exergía ( $X_{química}$ ). En el proceso 3-4 se expande el fluido

adiabáticamente, por lo cual la exergía se analiza de la misma manera que en el proceso 1-2. Por último, en el proceso 4-1 se rechaza calor al ambiente, preparándose así el motor para iniciar nuevamente el ciclo.



**Figura 2.** Ciclo de combustión interna genérico. Donde  $Q_{abs}$  y  $Q_{ced}$  serán nombrados como  $Q_H$  y  $Q_L$ , respectivamente [15].

Para este caso de estudio, se analizará un MCI funcionando con ciclo Diesel, en el cual la transferencia de calor al sistema (proceso 2-3) ocurre a presión constante. En este caso, el trabajo útil del sistema está dado por  $W_{\text{útil}} = Q_H - Q_L$ . Donde  $Q_H$  y  $Q_L$  representan el calor absorbido y cedido por el sistema respectivamente.

Es importante recordar que cada transferencia de calor a través de una diferencia finita de temperatura conlleva generación de entropía y, por lo tanto, destrucción de exergía. Esta destrucción de exergía por transferencia de calor ( $X_{TC}$ ) puede ser representada como en la ecuación (8):

$$X_{TC} = T_0 \sum \frac{Q}{T} \quad (8)$$

Como se mencionó anteriormente, la combustión también representa una destrucción de exergía. Para cuantificarla, es necesario determinar primero, la entropía que se genera en el proceso. Un balance de entropía, en este caso, puede ser representado a través de la ecuación (9):

$$S_{\text{generada}} = S_{\text{producto}} - S_{\text{reactivo}} - \sum \frac{Q_{in}}{T} \quad (9)$$

La entropía de cada componente puede calcularse como:  $S_i = N_i \bar{s}_i(T, P_i)$ . Donde  $N_i$  representa el número

de moles del componente a estudiar y  $P_i$  la presión de dicho componente.

A partir de la ecuación anterior y la (9), se puede generar una ecuación para la exergía destruida por combustión como la siguiente:  $X_{\text{química}} = T_0 [\sum (N_i \bar{s}_i)_{\text{producto}} - \sum (N_i \bar{s}_i)_{\text{reactivo}}]$ . Donde  $\bar{s}_i$  a una temperatura y presión determinada está dada por:  $\bar{s}_i(T, P_i) = \bar{s}_i^0(T, P_0) - R_u \ln |y_i P_{\text{mezcla}} / P_0|$ , en donde,  $y_i$  representa la fracción molar y  $s^0$  la entropía absoluta del componente.

### 2.3 Exergía como medida de sostenibilidad

Si bien es cierto que conocer la cantidad de exergía disponible en un sistema por sí sólo no es indicador de sostenibilidad, es posible realizar un balance que exprese el cambio de exergía en el sistema y sea útil para medir la sostenibilidad del mismo [16]. El cambio negativo ( $\Delta X$ ) representará más exergía perdida que la transferida hacia el sistema inicialmente. Esto significaría que, debido a los procesos e irreversibilidades, se ha agotado el potencial de trabajo posible del sistema, y se ha destruido la exergía del ambiente, ya que la exergía no puede ser generada. En otras palabras, un balance de exergía negativo indica un proceso o sistema no sostenible.

$$\Delta X = X_{\text{ent}} - X_{\text{sal}} - X_{\text{dest}} \quad (10)$$

La ecuación (10) corresponde al balance de exergía donde  $X_{\text{ent}}$  y  $X_{\text{sal}}$  representan la exergía transferida por calor y trabajo hacia y desde el sistema respectivamente y para nuestro caso pueden ser calculadas a través del cambio de exergía en cada proceso.

### 2.4 Combustibles para el estudio

Para comprobar el método científico en el proyecto, se escogieron aleatoriamente distintos combustibles de trabajo que se sometieron al mismo estudio. Los combustibles utilizados se listan en orden alfabético a continuación:

- Benceno ( $C_8H_{18}$ )
- Butano ( $C_4H_{10}$ )
- Etano ( $C_2H_6$ )
- Hidrógeno ( $H_2$ )
- Metano ( $CH_4$ )
- Octano ( $C_8H_{18}$ )
- Propano ( $C_3H_8$ )
- Propileno ( $C_3H_6$ )

### 3. Análisis de resultados y discusión

Se realizó un análisis exergético para un ciclo Diesel operando entre los estados definidos en la tabla 1. Todos los resultados fueron obtenidos con el software EES [17].

Si a partir del trabajo útil entregado por el motor, se calcula la eficiencia térmica (primera ley), obtenemos una eficiencia total de 52.04%, valor que entra en el rango usual para la eficiencia de MCIs [1] y que será comparado con los valores de eficiencia exergética (segunda ley).

Tabla 1. Propiedades correspondientes para cada estado del MCI.

	Estado 1	Estado 2	Estado 3	Estado 4
T (°C)	30	513.8	1301	605.2
P (kPa)	100	3115	3115	289.7
u (kJ/kg)	216.6	582.1	0.145	656.9
s (kJ/kmol-K)	5.716	5.716	6.519	6.519
v (m <sup>3</sup> /kg)	0.8701	0.07251	0.145	0.8701
h (kJ/kg)	263.7	807.9	1726	1973

Para este análisis, se tomaron en cuenta las reacciones de combustión de los distintos combustibles, con el propósito de hacer una comparación entre la exergía destruida por cada uno de ellos. Estos resultados se muestran en la tabla 2, ordenados descendientemente. A partir de esta tabla se puede apreciar que al utilizar etano como combustible, se destruye una menor cantidad de exergía en la combustión, comparada con la de los otros combustibles.

Tabla 2. Exergía destruida por combustión por combustible.

Combustible	Xquímica [kJ/kg]
Octano (C <sub>8</sub> H <sub>18</sub> )	13 449
Propano (C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> )	13 295
Metano (CH <sub>4</sub> )	13 116
Propileno (C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> )	12 943
Benceno (C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> )	12 357
Hidrógeno (H <sub>2</sub> )	9745
Butano (C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> )	9307
Etano (C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> )	8672

Utilizando esta tabla como comparación entre la exergía destruida por combustión, y la destruida por transferencias de calor ( $X_{TC} = 477.7$  kJ/kg), se concluye que durante los procesos de combustión se destruye una cantidad de exergía considerablemente mayor a la destruida por la transferencia neta de calor en el sistema. Estos resultados permiten observar la capacidad que tienen los análisis exergéticos para localizar aquellas irreversibilidades que amenazan en mayor medida la eficiencia del MCI.

Con los resultados del trabajo útil y la exergía total destruida durante los distintos procesos del motor, se calculó la eficiencia exergética definida por la ecuación (7) para los combustibles mencionados. Como se dedujo de la ecuación, aquellos combustibles que producen más entropía en la combustión reflejan una menor eficiencia, puesto que destruyen mayores cantidades de exergía. De esta manera, resulta ser el etano el combustible más eficiente en comparación a los demás, alcanzando un valor de eficiencia de 5.485% (figura 2).

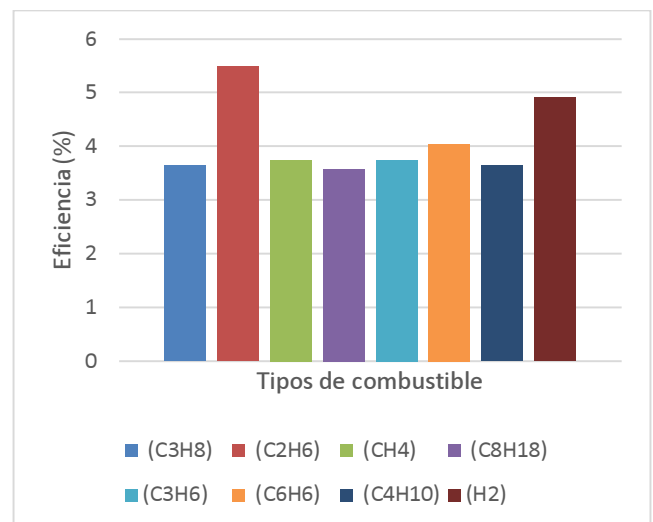


Figura 3. Valores de eficiencia exergética para un MCI operando con distintos combustibles.

Comparando las eficiencias del motor según primera y segunda ley, se puede observar una amplia diferencia entre ambas que se debe a que los principios de la primera ley que formulan la eficiencia toman en cuenta la cantidad de energía en un sistema, mas no la calidad de esta. En otras palabras, la eficiencia térmica falla en evaluar qué tanta de la energía del sistema está realmente disponible para realizar trabajo útil. Razón por la cual la eficiencia térmica puede resultar engañosa,

mostrándonos un desempeño más alto del verdadero. De esta manera, se resaltan los estudios realizados por otros autores [2], donde se enfatiza en la necesidad de combinar los principios de la segunda ley con los de la primera, para obtener un indicador de eficiencia más preciso. A pesar de que los resultados entre ambas eficiencias muestran una gran diferencia, se han realizado otros estudios, como el de Novak [16], en el cual se demuestra que dependiendo del sistema estudiado, las eficiencias pueden diferir hasta en un 80%.

Como último punto y con el propósito de aplicar el concepto de exergía como indicador de sostenibilidad, se calculó el cambio de exergía neto expresado en la ecuación (10) para cada caso de combustible, obteniendo como resultado únicamente cambios negativos de exergía, lo que se traduce en que, debido a la gran cantidad de entropía generada durante los procesos, el sistema destruyó más exergía que la transferida a él inicialmente. De esta manera se concluye que, para los combustibles utilizados, un MCI operando en ciclo Diesel, no puede considerarse sostenible. En la figura 3, se muestra una gráfica radial que indica el balance exergético para cada combustible.

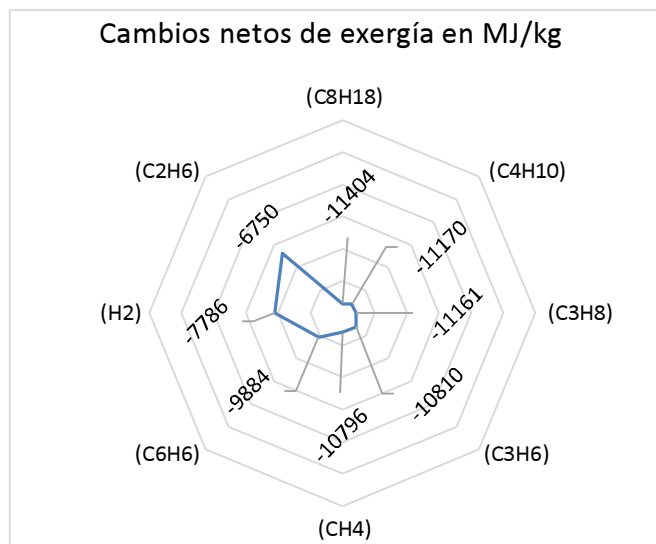


Figura 4. Cambios de exergía para distintos combustibles.

#### 4. Conclusiones

El análisis exergético para el caso de estudio con distintos combustibles demostró ser eficaz al localizar las irreversibilidades del sistema que disminuyen la eficiencia. Bajo los parámetros utilizados, se mostró que a través de los procesos de combustión disminuye

cuantiosamente la calidad de la energía contenida en el sistema incluso más que en los procesos de transferencia de calor.

Al ser comparado este análisis con el método de eficiencia según la primera ley, queda en evidencia que el último resulta obsoleto al momento de evaluar la energía disponible para realizar trabajo útil.

Por otro lado, los resultados obtenidos con el indicador de sostenibilidad demuestran que los sistemas que involucran procesos de combustión tienden a ser poco sostenibles. Sin embargo, se recomienda ampliar el análisis exergético a otros tipos de combustible como por ejemplo los biocombustibles (bioetanol, biometano, biodiesel). De igual manera, se recomienda investigar otros indicadores de sostenibilidad basados en la exergía como, por ejemplo, aquellos que toman en cuenta las emisiones de CO<sub>2</sub>.

Es importante destacar que para este proyecto no se tomó en cuenta la entropía generada por efectos de la fricción, lo cual, de haberlo hecho, resultaría en un análisis y resultados más cercanos a la realidad sobre la cantidad de exergía destruida en el sistema.

#### 5. Referencias

- [1] J. Gaviria Rios, J. Mora, and J. Agudelo, "Historia motores de combustión," *Rev. Fac. Ing.*, no. 26, pp. 68–78, 2002.
- [2] E. Sciubba and G. Wall, "A brief commented history of exergy from the beginnings to 2004," *Int. J. Thermodyn.*, vol. 10, no. 1, pp. 1–26, 2007, doi: 10.5541/ijot.1034000184.
- [3] J. H. Keenan, "Availability and irreversibility in thermodynamics," *Br. J. Appl. Phys.*, 1951, doi: 10.1088/0508-3443/2/7/302.
- [4] M. Gong and G. Wall, "Exergy analysis of the supply of energy and material resources in the Swedish society," *Energies*, vol. 9, no. 9, pp. 1–16, 2016, doi: 10.3390/en9090707.
- [5] P. S. Varbanov, H. H. Chin, A. E. P. Popescu, and S. Boldyryev, "Thermodynamics-based process sustainability evaluation," *Energies*, vol. 13, no. 9, May 2020, doi: 10.3390/en13092132.
- [6] U. Lucia and G. Grisolia, "Exergy inefficiency: An indicator for sustainable development analysis," *Energy Reports*, vol. 5, pp. 62–69, Nov. 2019, doi: 10.1016/j.egy.2018.12.001.
- [7] G. Boroumandjazi, B. Rismanchi, and R. Saidur, "A review on exergy analysis of industrial sector," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 27, pp. 198–203, 2013, doi: 10.1016/j.rser.2013.06.054.
- [8] "Global Greenhouse Gas Emissions Data." <https://www.epa.gov/ghgemissions/global-greenhouse-gas-emissions-data>.
- [9] C. D. Rakopoulos and E. G. Giakoumis, "Simulation and exergy analysis of transient diesel-engine operation," *Energy*, 1997, doi: 10.1016/S0360-5442(97)00017-0.
- [10] R. J. Primus and P. F. Flynn, "ASSESSMENT OF LOSSES IN

DIESEL ENGINES USING SECOND LAW ANALYSIS,” 1986.

- [11] A. C. Alkidas, “The use of availability and energy balances in diesel engines,” 1989, doi: 10.4271/890822.
- [12] A. Datta and S. K. Som, “Effects of spray characteristics on combustion performance of a liquid fuel spray in a gas turbine combustor,” *Int. J. Energy Res.*, 1999, doi: 10.1002/(SICI)1099-114X(19990310)23:3<217::AID-ER473>3.0.CO;2-U.
- [13] S. Jafarmadar, R. Tasoujiazar, and B. Jalilpour, “Exergy analysis in a low heat rejection IDI diesel engine by three dimensional modeling,” *Int. J. Energy Res.*, 2014, doi: 10.1002/er.3100.
- [14] H. Dave, B. Sutaria, and B. Patel, “Influence of nozzle hole diameter on combustion and emission characteristics of diesel engine under pilot injection mode,” 2020, doi: 10.1088/1757-899X/810/1/012041.
- [15] A. Martinez v., “Motores de combustion interna,” vol. 4, no. 2. pp. 1–94, 2007, doi: 10.1515/dmvm-1996-0202.
- [16] P. Novak, “Exergy as Measure of Sustainability of Energy System,” *Int. J. Earth Environ. Sci.*, vol. 2, no. 2, Oct. 2017, doi: 10.15344/2456-351x/2017/139.
- [17] “EES software.” <http://fchartsoftware.com/ees/>.