

ESTADO DEL ARTE SOBRE LA INFLUENCIA DE MEZCLAS ETANOL-GASOLINA EN EL DESEMPEÑO DE MOTORES DE COMBUSTION INTERNA

STATE-OF-THE-ART REVIEW OF ETHANOL-GASOLINE MIXTURES INFLUENCE ON PERFORMANCE CHARACTERISTICS IN INTERNAL COMBUSTION ENGINES

Josué Mario Andia-Vargas, Marco Salinas-Rojas, Renán Orellana Lafuente, Daniel Felipe Sempértégui-Tapia

Centro de Investigaciones Ópticas y Energías (CIOE)
Universidad Privada Boliviana, Cochabamba - Bolivia
dsempertegui@upb.edu

(Recibido el 12 de julio 2023, aceptado para publicación el 22 de julio 2023)

RESUMEN

Actualmente, la matriz energética en Bolivia depende en gran medida de los combustibles fósiles, hecho que conlleva a problemas económicos especialmente considerando que la producción de gasolina en Bolivia no cubre la demanda del mercado interno y que se tiene que recurrir a la importación a precios elevados. Además, la transición hacia una matriz energética más limpia también puede impulsar la innovación y desarrollo de nuevas tecnologías y soluciones para abordar el cambio climático y proteger el medio ambiente, aspectos que son promovidos por las Naciones Unidas con los Objetivos de Desarrollo Sostenible 7 y 11. En este sentido, este trabajo se centra en el estado del arte de la influencia de mezclas etanol-gasolina en el desempeño de motores de combustión interna, con el objetivo de tener un punto de partida para un posible uso de estas mezclas en el país y así reducir el consumo de gasolina. Inicialmente, se realizó un estudio de las propiedades fisicoquímicas de diferentes mezclas de combustible gasolina-etanol encontrados en la literatura. Después, se analizó el efecto del porcentaje de etanol en la mezcla en parámetros que definen el desempeño de un motor como: la eficiencia térmica, el consumo específico de combustible al freno, la máxima torsión de frenado y el consumo específico de combustible. Finalmente, se realizó un análisis exhaustivo de la literatura concerniente a efectos de la mezcla etanol-gasolina en el impacto al medio ambiente y efectos negativos al motor.

Palabras Clave: Etanol, Combustible, Motor de combustión interna, Poder Calorífico, Octanaje, Eficiencia.

ABSTRACT

Currently, the energy matrix in Bolivia relies heavily on fossil fuels, a fact that leads to economic problems especially considering that gasoline production in Bolivia does not meet the demand of the domestic market and the country has to import gasoline at high prices. In addition, the transition to a cleaner energy matrix can also drive innovation and development of new technologies and solutions to address climate change and protect the environment, aspects that are encouraged by the United Nations with Sustainable Development Goals 7 and 11. In this sense, this work focuses on the state-of-the-art review on the influence of ethanol-gasoline blends on the performance of internal combustion engines, with the objective of having a starting point for a possible use of these blends in the country and thus reduce gasoline consumption. Initially, a study of the thermochemical properties of different gasoline-ethanol fuel blends found in the literature was carried out. Then, the effect of the percentage of ethanol in the blend on parameters that define the performance of an engine such as: thermal efficiency, specific fuel consumption at braking, maximum braking torque and specific fuel consumption was analyzed. Finally, an analysis of the literature concerning the effects of the ethanol-gasoline blend on the environment impact and negative effects on the engine was carried out.

Keywords: Ethanol, Fuel, Spark Ignition Engine, Calorific value, Octane rating, Efficiency.

1. INTRODUCCION

La creciente demanda energética en Bolivia, el aumento del parque automotor y la insuficiente producción interna de gasolina y diésel han generado la necesidad de buscar alternativas renovables para garantizar un suministro sostenible de estos combustibles. En este contexto, es fundamental explorar opciones de transición de combustibles fósiles a fuentes renovables. La diversificación de la matriz energética hacia fuentes renovables, tales como el etanol, no solo ayudaría a reducir la dependencia de los combustibles fósiles, sino que también fomentaría la innovación tecnológica, generaría empleo local y promovería un desarrollo económico más sostenible. Además, esta transición energética permitiría a Bolivia ser un país más autónomo con su suministro energético y mitigar los riesgos asociados con la subvención de los combustibles fósiles.

En la actualidad, debido a que la producción de gasolina y diésel en Bolivia no cubre la demanda interna, el Estado se ve obligado a importar estos combustibles. Además, el Estado subvenciona los precios de estos combustibles, lo que implica un costo significativo. Actualmente, el precio de la gasolina es de 3,76 Bs/litro con subvención, pero sin esta, el precio podría alcanzar hasta 11-12 Bs/litro [1], como fue resaltado en un artículo del periódico La Razón. Ante esta situación, es imperativo buscar alternativas tecnológicas más eficientes y sostenibles.

Entre las opciones destacan los vehículos eléctricos, vehículos híbridos e incluso el uso de etanol (como mezcla con gasolina) para reducir la demanda de gasolina. Estas opciones permitirían diversificar la matriz energética del transporte y disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero. Además, estas tecnologías ofrecen soluciones viables en términos de costos, eficiencia energética y emisiones.

El uso de etanol, combinado con gasolina, ha demostrado ser un método efectivo para reducir la dependencia de los combustibles fósiles, como se ha observado en países como Estados Unidos y Brasil. Además, el etanol se produce a partir de fuentes renovables, como la caña de azúcar, maíz o soya, lo que contribuiría a diversificar la matriz energética y promover una movilidad más amigable con el medio ambiente.

En este sentido, el objetivo de esta investigación es analizar la influencia de las mezclas de gasolina y etanol en el rendimiento de los motores de combustión interna. Para lograr estos objetivos, se realizó una investigación de las propiedades más relevantes de un combustible fósil, como el número de octanos de investigación, el número de octanos del motor y el poder calorífico. Luego, se llevó a cabo un análisis cuantitativo comparando la previsión del poder calorífico de las mezclas de gasolina y etanol con valores experimentales. A continuación, se realizó una recopilación sistemática y exhaustiva de estudios relevantes sobre el uso de mezclas de gasolina y etanol en motores, centrándose en parámetros clave como el consumo de combustible específico al freno (BSFC), el par máximo de frenado (MBT) y el consumo específico de combustible (SFC). Posteriormente, se llevó a cabo un análisis comparativo y detallado del efecto de las mezclas de gasolina y etanol en comparación con la gasolina pura en estos parámetros. Finalmente, se analizó la literatura relacionada con los efectos ambientales y posibles impactos negativos en el motor con el uso de mezclas gasolina-etanol. Por otro lado, vale mencionar que esta revisión de la literatura también tiene como objetivo ser punto de partida para un proyecto que pretende analizar la influencia de mezclas gasolina-etanol en motores de manera experimental.

2. PROPIEDADES DE MEZCLAS GASOLINA-ETANOL

2.1. Número de Octanos de Investigación (RON) y Numero de Octanos del Motor (MON)

El RON es el número de octanos de un combustible utilizado para medir la capacidad antidetonante del mismo, siendo un indicador del desempeño de la gasolina en condiciones afables (generalmente bajas temperaturas y velocidades). Por ejemplo, si un combustible tiene un RON bajo, significa que tiene una menor resistencia al golpeteo en condiciones de bajas temperaturas y velocidades. Esto puede provocar la auto-ignición de la mezcla aire-combustible antes del encendido con la bujía, lo cual afecta el avance del frente de llama en el cilindro del motor y puede causar un fenómeno denominado golpeteo (*knocking*). Por otro lado, el MON es el número de octanos del motor, que como su nombre indica el comportamiento del motor que esté utilizando el combustible. El MON es un indicador que proporciona indicios del desempeño del combustible en condiciones severas (elevadas temperaturas y velocidades). Por ejemplo, si el MON es pequeño entonces implicaría una mayor incidencia de golpeteo en el motor, lo que puede generar ruido, vibraciones e incluso daños a largo plazo si no se controla adecuadamente [2].

Como el etanol tiene un calor latente de vaporización mayor al de la gasolina, este tiene también un número de octanos relativamente elevado. En general, una gasolina *premium* llega a tener un RON alrededor de 98, mientras que una mezcla E15 (15% etanol y 85% gasolina) tiene un RON de 102. Para el MON, una gasolina *premium* presenta valores de 87.1 y una mezcla E15 valores de 88.4. Castillo-Hernández et al. [2] concluyen que la adición de etanol a las gasolinas tiende a mejorar el número de octanos de toda la mezcla, lo cual también se traduce en mejoras en el rendimiento de combustible del motor. Esto implica que, con un incremento de porcentaje de etanol en el combustible, el RON y el MON incrementarán también, mejorando las propiedades del combustible. El mismo comportamiento fue reportado por otros autores.

2.2. Poder Calorífico

El poder calorífico es una medida que indica la cantidad de energía calorífica que puede liberar un combustible al ser completamente quemado, en otras palabras, es la cantidad de calor generado por la combustión de una unidad de masa del combustible en condiciones estándar. En el caso de esta investigación se analiza la cantidad de MJ generado por cada kilogramo. Cabe añadir que hay dos tipos diferentes de poder calorífico, que son el poder calorífico inferior o *Lower Heating Value* (LHV) y el poder calorífico superior o *Higher Heating Value* (HHV). Por definición, el poder calorífico superior es igual al poder calorífico inferior más el calor de vaporización del contenido de agua en el combustible.

A medida que aumenta la concentración de etanol en la gasolina, cambian las propiedades del combustible, entendiéndose así que variará también el poder calorífico. Por tanto, se vuelve más difícil calcular con precisión poderes caloríficos inferiores si no se conocen las propiedades de las porciones de hidrocarburo. Geng et al. [3] proponen métodos para estimar el poder calorífico, enfocándose sobre todo en el LHV. Para calcular este valor, los autores proponen la siguiente ecuación:

$$LHV = 57.57 - 20 * \rho - 0.1519 * (\text{Porcentaje Etanol}) \quad (1)$$

La ecuación (1) presenta un método rápido para la obtención de este valor. La misma utiliza como parámetros los valores de la densidad (ρ) y del porcentaje de etanol, ayudando a tener una rápida aproximación para el LHV. Geng et al. [3] hicieron pruebas para describir el comportamiento de esta magnitud en función a sus dos parámetros. Por lo descrito por los autores se puede determinar que mientras mayor sea el porcentaje de etanol, menor será el poder calorífico como se puede apreciar de forma clara en la TABLA 1.

TABLA 1 - PROPIEDADES DE DOS TIPOS DE GASOLINA A DIFERENTES PORCENTAJES DE ETANOL, CASTILLO-HERNÁNDEZ *et al.* [2]

Concentración de etanol [%vol]	Magna			Premium		
	Densidad [kg/L]	Poder calorífico [MJ/L]	Diferencia en PC [%]	Densidad [kg/L]	Poder calorífico [MJ/L]	Diferencia en PC [%]
0	720,0±0,0	31,176	-	705,7±1,5	31,404	-
10	730,0±0,0	30,222	-3,1	715,0±0,0	29,816	-5,1
15	734,3±2,9	28,637	-8,1	720,0±0,0	29,808	-5,1

Lo mostrado en la Tabla 1 es una estimativa del poder calorífico para distintos porcentajes de etanol usando una ecuación empírica. Pero al ser basado en datos experimentales, esta ecuación presenta errores. Por tanto, la Figura 1 ilustra una comparación de valores reales vs. valores previstos por la ecuación (1). Para esta comparación, se recolectaron datos de mezclas gasolina-etanol comerciales y su comportamiento real en motores de [4]. A partir de estos datos, se estimaron los valores previstos para el LHV y se logró ver la variación entre los mismos.

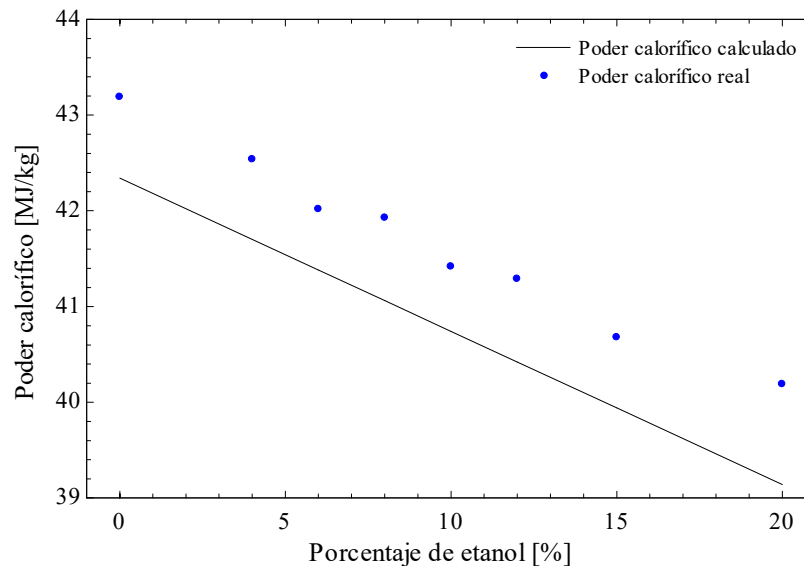


Figura 1: Diferencia entre poder calorífico real y calculado.

Como observado en la Figura 1, la ecuación (1) subestima en aproximadamente 2% el valor real del poder calorífico para porcentajes de etanol del 0 al 20%. Esto ocurre debido principalmente a que las propiedades se ven afectadas por la interacción entre los componentes del motor y el mismo combustible (inmersión).

Empleando valores aproximados expuestos por Kumar y Ashok [5], que consideran efectos de la inmersión en la densidad y en el poder calorífico se realizaron nuevos cálculos que pueden ser observados en la Figura 2, hay 4 grupos de puntos de dispersión, aquí el primero es el de la gasolina (E0), donde los puntos corresponden a la prueba antes de la inmersión, en el anillo, en la válvula y en el pistón respectivamente. El segundo grupo es combustible E20, el tercero E50 y el cuarto E100 en los mismos puntos.

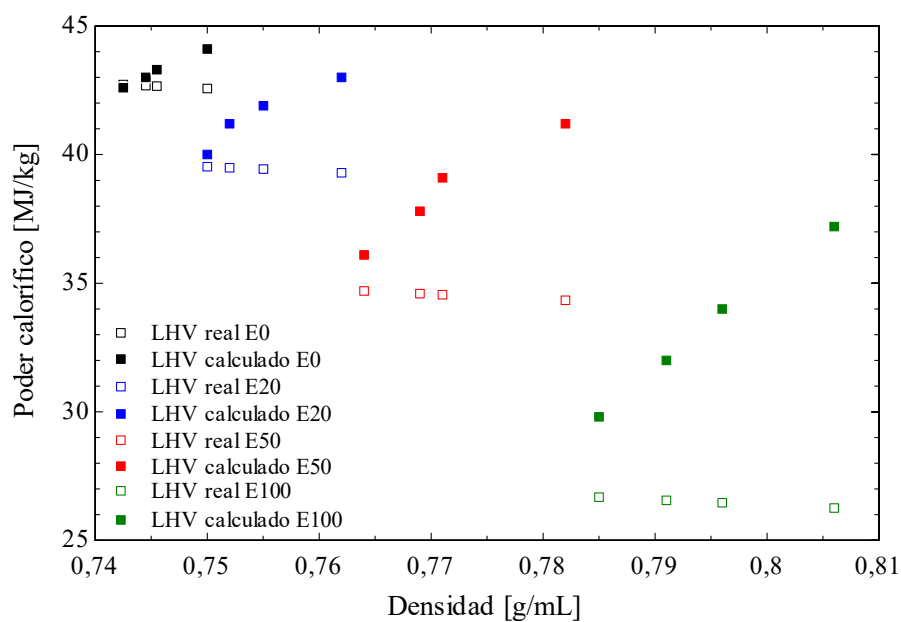


Figura 2: Variación del LHV en función a la variación de densidad por inmersión.

Las experiencias realizadas por Kumar y Ashok [5], muestran valores para el primer caso (E0) con una variación alrededor del 3%, sin embargo, los valores para la última (E100) son más elevados. Se debe tomar en cuenta que la fase más crítica de todo el motor es el pistón.

3. ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA LITERATURA RELEVANTE

3.1. Metodología Usada para la Selección de Fuentes

La metodología utilizada para la selección de fuentes en esta revisión de la literatura se basó en un enfoque sistemático. En primer lugar, se realizó una búsqueda exhaustiva de artículos científicos que tengan alguna relación al uso de mezclas de etanol con gasolina como combustible para motores de combustión interna. Para esta revisión fue necesario recabar información fidedigna y justificada con base científica, por lo que se consultaron bases de datos especializadas en contenido científico, como bibliotecas digitales o repositorios académicos. Los criterios de filtrado para la selección de fuentes se realizaron bajo un enfoque objetivo en donde los principales criterios de inclusión o exclusión fueron orientados a parámetros como literatura relevante en el análisis del desempeño de mezclas de combustible, estudios experimentales orientados al rendimiento del motor a ciertas pruebas y estudios numéricos orientados al análisis de la variación que tienen combustibles en base a etanol para validar su funcionamiento.

3.2. Tabulación de la Información Recopilada

Siguiendo los criterios mencionados en la sección anterior, se recopiló información relevante de distintos estudios para tratar el tema del etanol como combustible. En la siguiente tabla se muestran estudios tanto numéricos como experimentales que evalúan el rendimiento del etanol. Esto analizando factores como el BSFC, MBT, radio de compresión, entre otros en diferentes composiciones de mezclas de etanol, desde E0 hasta E100, con el fin de tener resultados para una gran cantidad de muestras. Es así que la TABLA se basa principalmente en estudios y conclusiones que evalúan ventajas generales del uso de mezclas de gasolina-etanol. Al mismo tiempo, la tabla ayuda a resumir la información más importante y expone las características más destacables de las mezclas evaluadas.

TABLA 2 - ESTUDIOS RELACIONADOS A LA INFLUENCIA DE LA MEZCLA GASOLINA-ETANOL EN EL DESEMPEÑO DE MOTORES

Autor(es)	Porcentaje y tipo de etanol	Tipo de estudio	Conclusiones
Turkoz N, et al. [6]	E85 (Anhydrous)	Experimental, estudio de los efectos de las variaciones del avance en distintas velocidades para el E85	Se hace un análisis de potencia y eficiencia del avance del encendido en un motor de combustión interna usando E85. Se comprobó que existe un incremento del torque y potencia con tiempos de ignición avanzados, el avance óptimo para el E85 es de 4.
Amaral et al. [7]	E25, E85, E15, E10 y E0 (Anhydrous)	Experimental, estudio de emisión de gases, rendimiento del motor y análisis económico del precio del etanol en Estados Unidos y Brasil	<ul style="list-style-type: none"> • Con un mayor número de octano de investigación, es menos susceptible que ocurra un picado de bielas y como producto de esto se puede llegar al MBT por la variación en el tiempo de encendido. Con un menor RON aumenta el ISFC • Las emisiones de HC aumentan si se usa combustible aromático. El efecto de enfriamiento por el etanol reduce la temperatura del cilindro, logrando reducir un 32% la emisión de NOx • El análisis económico muestra que, con el mayor contenido de etanol, se redujo más del 23% en precio por cada kW producido
Yücesu et al. [8]	E0, E40, E60 (Anhydrous)	Experimental, estudio del rendimiento del motor y emisiones de escape a diferentes composiciones y rangos de compresión.	<ul style="list-style-type: none"> • Con un radio de compresión 11:1 a 2000 rpm el torque del motor aumentó 8% y el BSFC decreció. • Con un radio de compresión 11:1 el BSFC decreció • En comparación a este combustible, los de etanol tienen ventaja al momento de alcanzar el MBT y menores BSFC.
Costa y Sodré [9]	E22(Anhydrous), E100 (hydrous)	Experimental, mediante un dinamómetro configurado a máxima potencia y torque se verifica la influencia del radio de compresión cuando se trabaja con etanol E22 y etanol hidratado en un motor de combustión interna.	Se logra evidenciar los efectos del uso de E22 y Etanol hydrous en la relación de compresión para el rendimiento de un motor. Podemos ver que el E22 exige un retraso en el encendido a diferencia del etanol hidratado. Por otro lado, el consumo específico de combustible es mayor en el etanol hidroso que en el E22. Igualmente, el SFC disminuye y la eficiencia térmica aumenta cuando se tiene un incremento en la relación de compresión para el etanol hidratado.
Mohammed et al. [10]	E10, E20, E30, E40 (Anhydrous)	Experimental, comparación entre gasolina y 4 distintos combustibles en pruebas de potencia, eficiencia térmica, eficiencia volumétrica, BSFC y emisiones al exterior	<ul style="list-style-type: none"> • La potencia de frenado aumenta con el incremento de velocidad en motores a gasolina, se tiene la misma tendencia a mejorar para los combustibles E10, E20 y E30. • Añadir etanol aumenta la eficiencia térmica hasta 31.12% con el E40 en promedio. Se observó que se quema menos combustible, la duración de combustión disminuye con el aumento del combustible mezclado y también disminuyen las pérdidas por transferencia de calor aumentando la eficiencia térmica de frenado del motor. • Se encontró que con las pruebas de E40 disminuyó el BSFC en un 17.12%, siguiendo esta tendencia a disminuir en los demás combustibles. • En las pruebas se demostró que, si se aumenta la cantidad de etanol, disminuyen las emisiones de CO, CO₂, HC y NOx
Xiang et al. [11]	E10, E50 (Anhydrous)	Numérico, Medición de los efectos de la mezcla de etanol en la velocidad, torque y potencia de un motor avanzado de inyección DFSI con un dinamómetro	Se puede alcanzar a optimizar el uso de Etanol-Gasolina en motores DFSI mediante la aplicación de la tecnología de combustión Oxy-Fuel.
Zapata et al. [12]	E10-E50 (Hydrous)	Numérico, Análisis exerético en la variación del radio de compresión para combustible mezclado con etanol en un motor de combustión interna.	La mejor performance para un motor de combustión interna de un cilindro se da con E50 con una compresión 12:1
Eyidogan et al. [13]	E5, E10 (Anhydrous)	Experimental, se realizó el estudio de los efectos de combustión utilizando un combustible mezclado con etanol en un motor de cuatro cilindros, cuatro cambios y un sistema de múltiple inyección para un motor de combustión interna.	Para el BSFC se encontró que el E5 tiene un incremento del 2,8% y el E10 de un 3.6% para una velocidad de 80 km/h.

En la siguiente sección se analizará más a detalle estos estudios y su influencia en los parámetros más importantes en el desempeño de un motor.

4. EFECTO DEL PORCENTAJE DE ETANOL EN EL DESEMPEÑO DE LOS MOTORES

El desempeño de un motor se mide con varios parámetros, entre los que podemos mencionar: la eficiencia térmica y su efecto con la relación de presiones; el consumo de combustible específico al freno, o *Brake Specific Fuel Consumption* (BSFC); la máxima torsión de frenado, o *Maximum Brake Torque* (MBT) y el consumo específico de combustible, o *Specific Fuel Consumption* (SFC).

A continuación, se analiza el efecto del porcentaje de etanol en cada uno de estos parámetros más a detalle.

4.1. Relación de Presión y Eficiencia Térmica del Motor

Un aumento en la relación de compresión da como resultado una mejor mezcla de combustible y una temperatura más alta durante la carrera de compresión. Además, se espera que el aumento en la relación de compresión resulte en un aumento en la presión del cilindro, lo que conduce a un retardo de encendido reducido y la combustión se produce cerca del TDC (*top dead centre*) [14].

Folayan et al. [15] demuestran cómo la relación de presión afecta ciertas propiedades del motor de forma experimental. Por un lado, se demuestra que la variación de potencia de frenado a diferentes relaciones de presión y velocidad tiene un comportamiento casi lineal para rangos de velocidades de 1300 a 1600 rpm. Al mismo tiempo, esta relación de presión afecta en el consumo específico de combustible, tal como se aprecia en la Figura 3, que describe la relación entre radio de compresión y *Specific Fuel Consumption* (SFC).

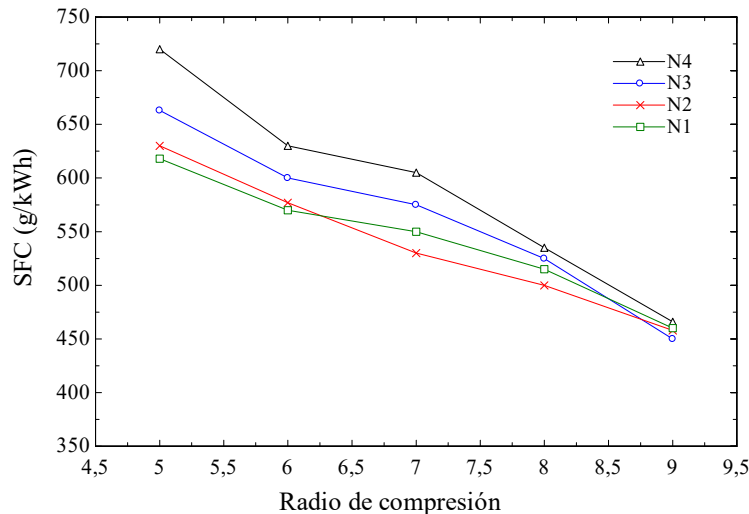


Figura 3: Variación del SFC con la relación de compresión para diferentes velocidades del motor [15].

4.2. Brake Specific Fuel Consumption (BSFC)

El BSFC es un parámetro que indica la eficiencia del combustible que se utiliza en un motor que produce una potencia de rotación en su salida [16]. La aplicación de esta medida está relacionada en la determinación de características que tenga un combustible y está directamente relacionado con el valor calorífico, que tienen una relación inversamente proporcional. Esto básicamente debido a que una reducción en el valor calorífico se traduce directamente en un aumento del consumo de combustible en el motor para alcanzar una potencia determinada. Además, vale mencionar que el término freno dentro del parámetro hace referencia al uso del freno eléctrico del dinamómetro que se utiliza para medir los parámetros necesarios en el cálculo del BSFC.

El BSFC se obtiene mediante la relación de la cantidad de combustible utilizado y la potencia de salida del motor como se puede ver en la ecuación (2) [16].

$$BSFC [Kg/J] = \dot{m}_f [kg/s] Pe [W] \quad (2)$$

Otra manera de calcular el BSFC es la relación del flujo de masa y en lugar de la potencia del motor efectiva se utiliza el torque efectivo del freno y la velocidad del motor [16].

$$BSFC \left[\frac{kg}{J} \right] = \dot{m}_f \left[\frac{kg}{s} \right] * \omega_e [rad/s] * T_e [Nm] \tag{3}$$

Para calcular el Torque Efectivo se obtiene en función a la presión media efectiva como se expresa en la ecuación (4):

$$T_e = n_{cil} * V_d * PME / 2n_r \tag{4}$$

Desglosando la ecuación podemos ver que se multiplica el número de cilindros (n_{cil}), la cilindrada (V_d) y la presión media efectiva (PME) y se divide entre la relación del número de rotaciones (n_r) del cigüeñal para un ciclo completo del motor.

Considerando la definición del BSFC, la primera conclusión a la que podemos llegar es que la eficiencia del motor es mayor cuando el valor del parámetro BSFC es menor. En términos generales el BSFC para un motor de combustión interna es de 250 g/kWh, en este sentido se verifica que los valores de mayor eficiencia se encuentran en un rango medio de velocidades y un rango elevado de torque [16].

Por otro lado, Verma *et al.* [17] realizaron algunos experimentos con un motor MPFI (sistema multipuertos de inyección electrónica) multi-cilíndrico de cuatro tiempos de combustión interna que está acoplado a un dinamómetro de corrientes de Foucault. El experimento se basa en operar el motor en distintas condiciones de velocidad y carga, lo cual permitió calcular parámetros de rendimiento, de los cuales nos centraremos en los obtenidos en relación al BSFC. Para este estudio se trabajó con distintas composiciones de combustible para poder compararlas y analizarlas de mejor manera, los combustibles con los que se trabajó están descritos en la TABLA .

TABLA 3 - ESPECIFICACIONES DE LOS COMBUSTIBLES UTILIZADOS POR VERMA *et al.* [17].

Propiedades del combustible utilizado				
Nombre del combustible	Concentración de gasolina [%]	Concentración de etanol [%]	Densidad [kg/m ³]	Poder calorífico [kJ/kg]
E0	100	0	720	42300
E6,25	93,75	6,25	740	43100
E10	90	10	745	42900

Los resultados referidos a la influencia del BSFC obtenidos de esta investigación experimental muestran la variación del BSFC con respecto al incremento de la velocidad de operación del motor y la carga para todas las muestras de combustible previamente mencionadas.

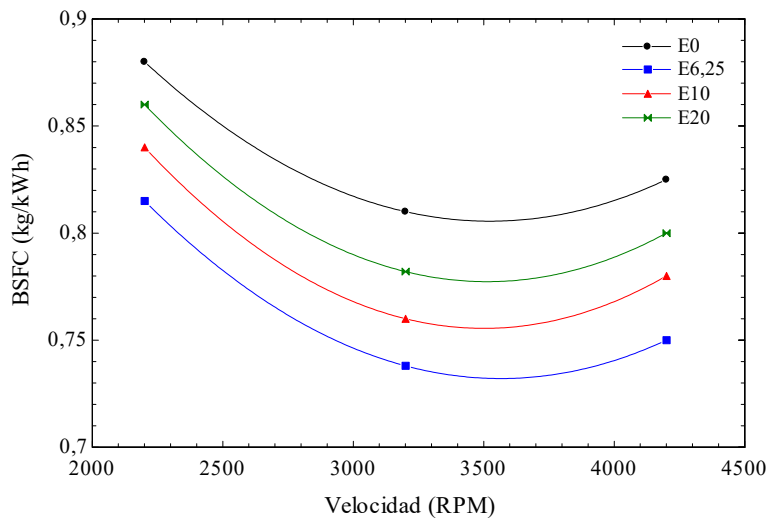


Figura 4: Representaciones gráficas de la variación del BSFC con respecto a la velocidad [17].

Como se puede observar en la Figura 4, el BSFC de la muestra disminuye conforme se incrementa la velocidad del motor. Como ya se explicó en la primera parte de este apartado el BSFC es un parámetro valioso para la determinación de la eficiencia del funcionamiento de un motor, un valor más bajo del mismo es equivalente a mejores resultados y como se puede ver en las gráficas obtenidas, el BSFC se incrementa con el incremento del porcentaje de etanol del combustible.

Además, también vale mencionar que el motor presenta un mayor BFSC para gasolina pura y que los mejores resultados obtenidos son los de la muestra E6.25, resultado que puede ser explicado probablemente porque esta mezcla tiene un mayor poder calorífico (ver Tabla 2). Otra observación importante a estos resultados es que el valor más bajo de BSFC para todas las muestras se encuentra alrededor de 3200 rpm, sin embargo, una vez superada esta velocidad vemos que el BSFC incrementa, esto se da debido a la disminución de la eficiencia térmica del freno.

El anterior análisis muestra que el uso de etanol en la gasolina trae ventaja y mejores resultados en cuanto al BSFC de un motor, sin embargo, es importante optimizar el porcentaje utilizado en función al poder calorífico que aporte a la mezcla combustible.

4.3. Maximum Brake Torque (MBT)

Otro de los parámetros más importantes para el desarrollo e investigación de los efectos del uso de mezclas combustibles con etanol para motores es el MBT o *Maximum Brake Torque*. Este mismo se puede entender de forma más directa como la posición óptima del ángulo de encendido para posicionar la presión que recibe el cilindro para maximizar el torque. Un ángulo de encendido bajo puede dar como resultado una acumulación de presión más temprana y a la vez una menor presión durante la última parte de la carrera de expansión. La acumulación de presión demasiado temprana puede afectar al movimiento del pistón y reducir el par de salida del motor [18]. Por otro lado, con un ángulo de encendido adelantado se puede tener una acumulación de presión tardía, que puede ser aprovechada para dar mayor palanca al cigüeñal. A pesar de esto es importante recalcar que una presión demasiado tardía no logra compensar las ventajas que tiene hacia las pérdidas que puede traer en el rendimiento del motor.

Considerando esto, podemos tener varios beneficios al operar un motor dentro de MBT, de forma más evidente se logra maximizar la producción de par en el motor, lo cual maximiza su eficiencia y a la vez mantiene al mínimo el consumo de combustible. Sin embargo, existen limitantes para alcanzar este nivel óptimo en la práctica, como por ejemplo para motores que trabajan con altas cargas se debe retardar el ángulo de encendido para poder evitar la destrucción del motor por golpe [18]. Sin embargo, el análisis en estas condiciones puede tener beneficios gracias a que se tienen parámetros de control más acertados debido a que se está haciendo el análisis en condiciones óptimas. Por lo general, la sincronización del ángulo de encendido para tener el MBT se determina mediante un barrido de chispa cuando se está haciendo la medición del par de frenado en el motor como se puede ver en la Figura 5.

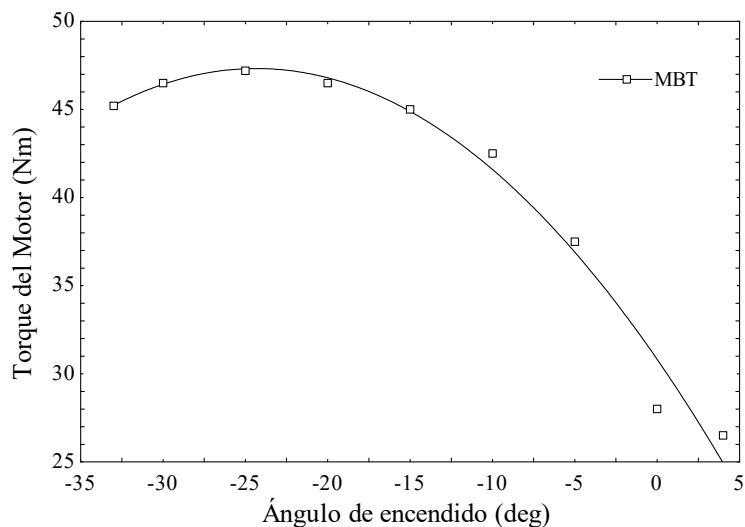


Figura 5: Torque de frenado del motor en función del ángulo de encendido [18].

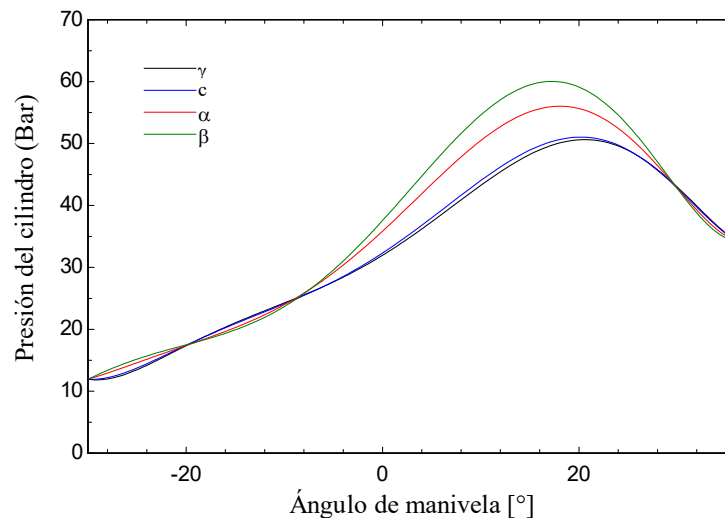
Para poder puntualizar el concepto de MBT y orientarlo hacia el desarrollo de esta investigación es que se toma el trabajo realizado por Amaral *et al.* [7]. En esta investigación, las mezclas de combustible utilizadas fueron testeadas en estado estacionario con carga completa y condiciones estequiométricas controladas a 4000, 4500, 5000 y 5500 rpm. Es importante destacar que la sincronización inicial de la chispa fue fijada en 18 BTDC para alcanzar el par máximo de frenado. Como se puede ver en la TABLA 4 la investigación está basada en distintos combustibles, teniendo en términos generales una composición alrededor entre 25.5% y 27.5% de etanol.

Otra consideración en la configuración para el análisis experimental es la reducción del tiempo de encendido de la chispa a dos pasos, con el objetivo de evitar dañar el motor en las pruebas. Finalmente, se limitó el tiempo final de la chispa con el objetivo de que el rendimiento del motor depende netamente de la carga, la velocidad y las condiciones del combustible que esté utilizando.

TABLA 4 - CARACTERÍSTICAS DE LOS COMBUSTIBLES EMPLEADOS EN LA INVESTIGACIÓN DE AMARAL *et al.* [7]

Principales Características	Tipo de muestra			
	α	β	γ	c
Densidad relativa	0.7705	0.7723	0.7577	0.74
RON	104.0	104.1	98.5	95.2
Composición Anhidro Etanol	25.5	25.8	25.7	27.5

Los resultados hallados de este análisis se pueden observar en la Figura 6 donde podemos ver la variación que sufre la presión en el cilindro durante la combustión de la mezcla con el pico de presión en el tiempo de encendido. El análisis se realizó a 5000 rpm. Entendiendo que la mezcla alcanza sus temperaturas más altas en el *Top Dead Center* podemos entender que es el punto más susceptible en cuanto a ocurrencia de detonaciones [7]. Igualmente, basados en los resultados mostrados en la figura podemos indicar que la composición del combustible es más susceptible a detonaciones por la operación a altas velocidad del motor y como esta incrementa la temperatura en los cilindros. Con esto se puede corroborar que para combustibles con bajo RON y compuestos de velocidad de flama laminares más lentos se tiene el suficiente retraso en el encendido para poder evitar el fenómeno de la detonación [7]. Un ejemplo de estas condiciones de composición es la gasolina convencional, por lo cual se puede entender que las mezclas de combustibles basadas en etanol deben buscar reducir su valor de RON y de velocidad de flama laminar. Estas condiciones son las que permiten trabajar con el motor en MBT. Debido a que el RON es uno de los factores cruciales para alcanzar el MBT en la operación de un motor.

**Figura 6:** Gráfica de la presión del cilindro de cada tipo de combustible trabajado [7].

Teniendo en consideración que las muestras de combustibles α y β tienen valores similares en RON, podemos observar en la Figura 6 que tiene valores más elevados en su curva de presión, a diferencia de la muestra γ que tiene un valor de RON 98,5 (ver Tabla 4), el cual es bastante cercano al de la gasolina regular, presenta menores picos de presiones y por lo tanto tiene mejores condiciones para alcanzar el estado de MBT en el motor en el que trabaja.

4.4. Specific Fuel Consumption (SFC)

Este valor indica la eficiencia con la que un determinado elemento va a trabajar, en este caso el motor. Gracias a esto, podemos hacer comparaciones para indicar qué tipo de motores o qué tipo de combustible se va a utilizar. El SFC indica la relación entre la cantidad de masa y el trabajo realizado. En este sentido, mientras menor sea la magnitud de este, más eficiente será, esto porque para producir la misma cantidad de trabajo, se necesita menor masa.

Según la investigación de Yucesu *et al.* [8] se logró hallar que el consumo específico de combustible (SFC) se redujo con el aumento de la relación de compresión, pero por otro lado, aumentó con el aumento de etanol en la mezcla combustible utilizada. Otro de los resultados alcanzados está relacionado con las temperaturas de gases de escape, que con el uso de etanol en la mezcla fueron más bajas debido a la rapidez de la velocidad de la llama de etanol en comparación con la gasolina tradicional. Dentro de esta investigación se puede integrar y ligar los resultados presentados en apartados anteriores relacionados tanto al BSFC como al MBT, teniendo ahora el análisis de estos con el enfoque en la relación de compresión en la que trabaja el motor (ver Figura 7).

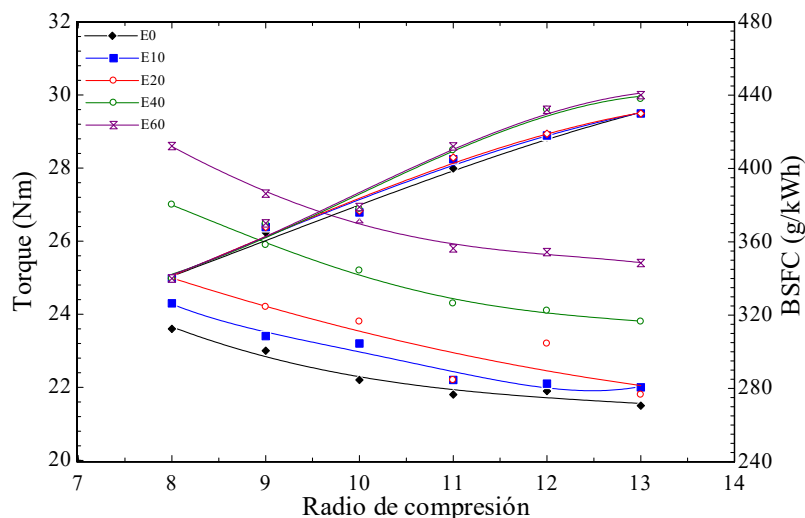


Figura 7: Variación del torque y BSFC en relación al radio de compresión [8].

En complemento a esto podemos ver la investigación de Costa y Sodré [9] que hacen un análisis al efecto del radio de compresion en el rendimiento de un motor que utiliza un combustible mezclado con 22% de etanol. En el estudio se logró corroborar que una alta relación de compresion genera mayores presiones del cilindro, lo cual equivale a un mayor trabajo sobre el pistón.

De forma más específica, dentro de los resultados hallados en la investigación podemos ver que en el caso de etanol hidratado es necesaria una mayor cantidad para poder alcanzar la unidad de potencia producida, esto entendido en relación a que el consumo específico de combustible expresa el caudal de combustible que requiere el motor por unidad de potencia producida. Entendiendo esto es que se explica que el valor del SFC del etanol hidratado sea mayor que el del E22 [9]. Como se puede ver en la Figura 8 el consumo específico de combustible se va reduciendo a medida que la relación de compresion se reduce, observando que la relación de compresion 10:1 tiene el SFC más elevado para gran parte del rango de velocidad analizado en la gráfica. Por esto se logra determinar que para poder reducir el valor del SFC en un motor que trabaja con etanol se debería aumentar la relación de compresion del mismo, al estar trabajando con combustibles que utilizan tanto gasolina como etanol en su composición esta opción es poco viable.

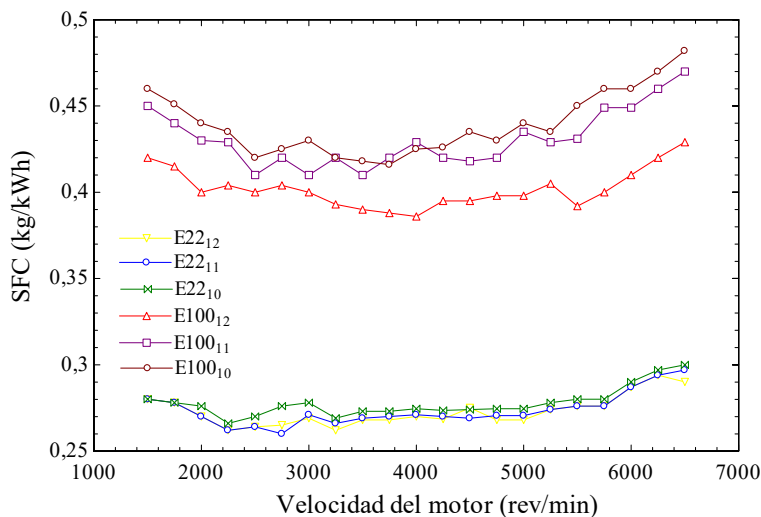


Figura 8: Variación del SFC en relación a la velocidad del motor y la relación de compresion [9].

5. OTRAS CONSIDERACIONES

5.1. Transformación de Motor Convencional a Uno de Mezcla de Etanol

Se necesita cambiar la entrada de combustible del motor, ya que la relación de aire-combustible que se tiene para etanol es aproximadamente 9 y para la gasolina arriba de 14 [19]. Para corregir esto se debe entender que los vehículos *flex fuel*

(vehículos diseñados para funcionar con más de un tipo de combustible) tienen un rango más amplio de ancho de pulso del inyector que permite hasta un 40% más de combustible líquido en la mezcla de combustible y aire. Los vehículos más antiguos con carburador deben tener inyectores más grandes para permitir un mayor flujo de combustible. Un surtidor es un accesorio de latón pequeño con un orificio en el centro que dosifica el combustible en el motor. Un vehículo que usa combustible mezclado con etanol debe tener un orificio mayor en dicho surtidor. Sin esta conversión esencial, la mezcla de aire y combustible será "pobre" (mucho aire y poco combustible en la mezcla), la cual se quema más que la mezcla normal de aire y combustible, y eso hace que el motor funcione con dificultad y experimente daños críticos con el tiempo. Algunas marcas de kit conversor regulan este problema sin necesidad de tener este cambio. Es importante también cambiar el aceite del motor y su respectivo filtro [20].

Considerando lo anterior, se entiende también que para la transformación de un motor normal a uno que pueda utilizar mezcla con etanol, se necesita adquirir un kit de conversión. Este dispositivo no cuenta con sensores y se conecta a la parte encargada de la inyección. La forma en la que este funciona se explica a continuación.

El principio operativo detrás del kit se basa en el procesamiento de las señales de inyección de combustible que se reciben del módulo de control electrónico del motor del automóvil. El kit controla el proceso de inyección de combustible, con cada uno de los inyectores de combustible del vehículo controlado por separado para optimizar el flujo.

Uno de los problemas del combustible E85 es la disminución de la capacidad de arranque en frío. El kit convertidor incluye un sensor de temperatura externo que regula las operaciones del dispositivo de acuerdo con la temperatura del motor y automáticamente agrega alimentación de combustible si es necesario, lo que permite el arranque en cualquier condición climática.

5.2 Impacto en el Medio Ambiente

Es importante analizar el impacto ambiental de las emisiones de los motores y destacar cómo influyen las emisiones de dióxido de carbono, metano y óxido nitroso en la contaminación del aire. Se destaca la diferencia en las emisiones entre los motores de combustible a base de etanol-gasolina y los motores tradicionales de gasolina, resaltando las ventajas ambientales de los primeros. Es por esto que Mohammed et al [10], experimenta las emisiones de distintos gases y distintos combustibles. Los gases que se analizaron en la investigación son monóxido de carbono, dióxido de carbono, emisiones de hidrocarburos y óxidos de nitrógeno. Además, emplea distintas velocidades para probar la influencia de la velocidad en las emisiones. Se utilizó en este caso gasolina pura y 4 mezclas con etanol, mismas con un 10, 20, 30 y 40% de etanol. En la Figura 9 se puede observar cómo se reducen las emisiones de CO₂ a medida que aumenta el porcentaje de etanol, compartiendo este comportamiento para las demás emisiones.

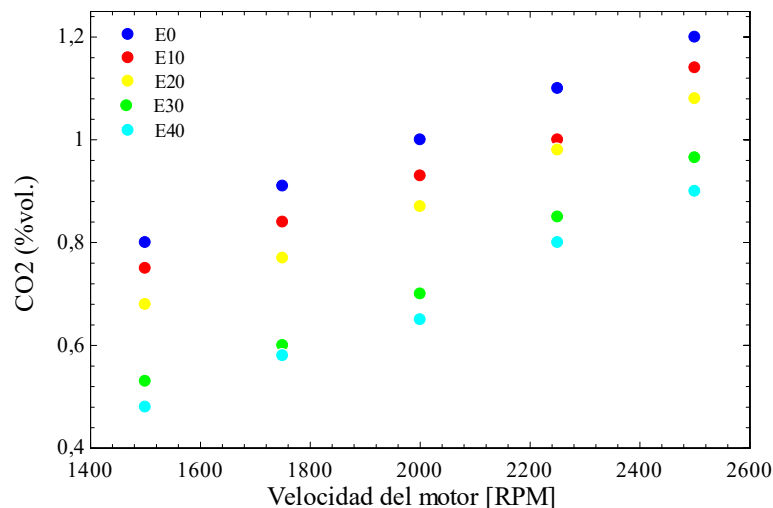


Figura 9: Efecto de la velocidad de un motor sobre las emisiones de CO₂, adaptado de Mohammed et al [10].

5.3. Efectos Colaterales en el Motor

Si bien es cierto que porcentajes de etanol en el combustible puede ser usado en ciertos motores sin ningún tipo de modificación, tampoco se puede negar el daño que este llega a causar. Según la evidencia expuesta en el artículo de Kumar y Ashok [5], el etanol tiene una influencia negativa en el pistón, anillo de pistón y la válvula. Se realizaron pruebas en estos 3 componentes sometiéndolas a 4 fluidos diferentes en 3 distintas horas de inmersión. Los resultados de esta experimentación se muestran en la Figura 8 para un periodo de medio año.

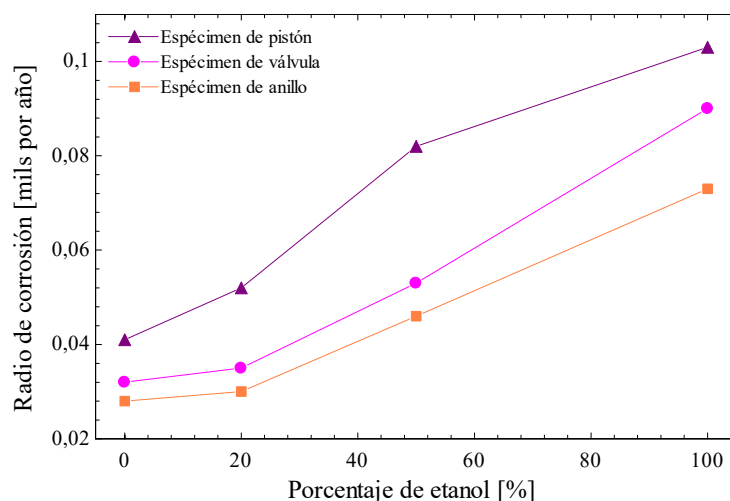


Figura 10: Corrosión tras la inmersión durante 4320 horas, adaptación de Kumar y Ashok [5].

Al mismo tiempo, los valores de la pérdida de masa vistos previamente se encuentran en la TABLA 5.

TABLA 5 - MEDICIONES DE PÉRDIDA DE PESO DE METAL DE PRUEBA, ADAPTADO DE KUMAR Y ASHOK [5]

Combustible de prueba	Pérdida de masa [mg]								
	1440 horas			2880 horas			4320 horas		
	Anillo	Válvula	Pistón	Anillo	Válvula	Pistón	Anillo	Válvula	Pistón
E0	9,0E-05	4,5E-04	2,0E+00	1,2E-04	6,0E-04	3,0E-04	1,8E-04	9,0E-04	4,0E-07
E20	1,3E-04	6,0E-04	3,0E-04	1,6E-04	8,0E-04	4,0E-04	2,0E-04	1,0E-03	5,0E-04
E50	2,2E-04	1,0E-03	5,0E-04	2,5E-04	1,2E-03	7,0E-04	3,1E-04	1,5E-03	8,0E-04
E100	3,0E-04	1,4E-03	6,0E-04	4,0E-04	2,0E-03	8,0E-04	5,0E-04	2,5E-03	1,0E-03

Con los datos anteriores se aprecia el efecto de la corrosión en la pérdida de masa, sin embargo, este no es el único resultado. Otro efecto que se encuentra es el cambio en las propiedades del combustible. El principal, es el cambio en la densidad antes y después de la inmersión. En la Figura 11 se observa el cambio en la densidad del combustible de prueba debido a la exposición de muestras de metal después de 4320 horas de inmersión a temperatura ambiente. Se observa que todos los combustibles de prueba inmersos en partes metálicas han aumentado en densidad respecto a su estado anterior (sin inmersión). Cabe añadir que la tasa de cambio de densidad de E100 es mayor que los combustibles con menor cantidad de etanol [5].

Después de exponerse a especímenes de metal, la densidad de E0 termina de variar, mientras que en el E20 exhibe un cambio menor. Por otro lado, los cambios en la densidad del E50 y E100 siguen las mismas tendencias con variaciones importantes. Sin embargo, el E100 demuestra mayores variaciones de densidad tras la exposición a muestras de metal. Esto es un resultado de la conversión de componentes de elementos metálicos en combustibles de prueba que experimentan un cambio en el entorno de oxígeno Kumar y Ashok [5].

Analizando los resultados de la Figura 11 y teniendo en cuenta las muestras de metal, los combustibles de prueba expuestos al anillo del pistón tienen un incremento mínimo en densidad en comparación a la etapa previa a la inmersión. Además, se registra una tendencia idéntica para la densidad de los combustibles de prueba que están expuestos a la válvula y al pistón, pero con mayor incremento. En consecuencia, los combustibles de prueba sometidos al pistón tienen la mayor variación de densidad entre los otros combustibles de prueba. Generalmente, el incremento en la densidad del combustible puede causar complejidad en la evaporación del combustible durante el proceso de combustión, lo que conduce al deterioro de las respuestas del motor Kumar y Ashok [4].

Como producto de la variación de las propiedades, también existe una variación en el poder calorífico del combustible. La variación se muestra en la Figura 12.

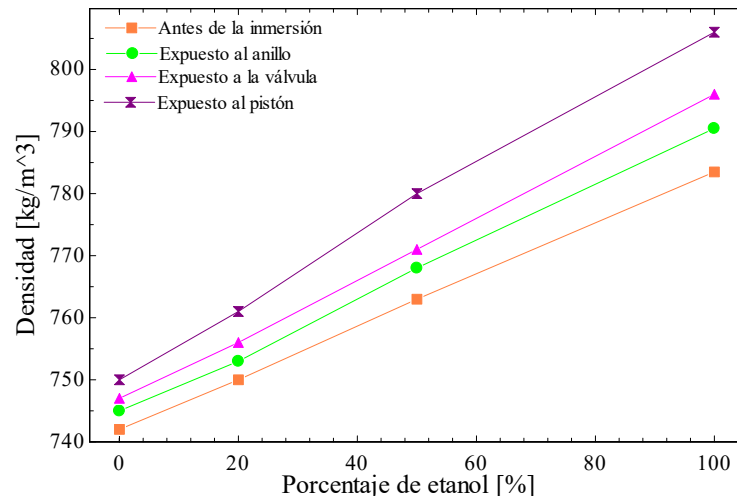


Figura 11: Densidad de los combustibles de prueba antes y después de la exposición al metal durante 4320 horas, adaptado de Kumar y Ashok [5].

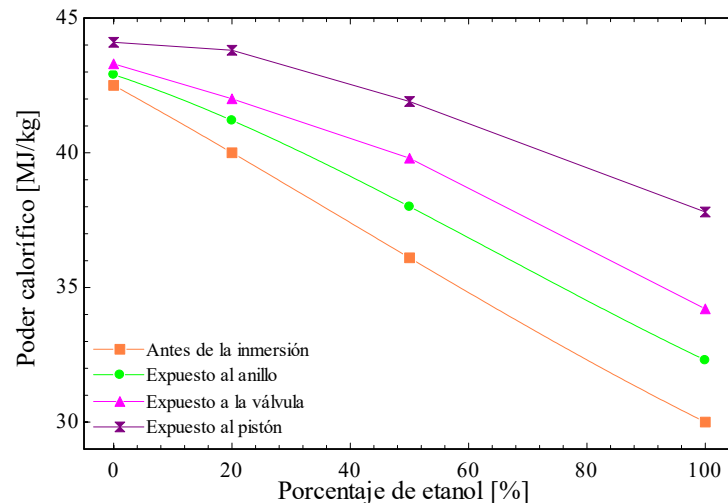


Figura 12: Poder calorífico de los combustibles de prueba antes y después de la exposición al metal por 4320 horas, adaptado de Kumar y Ashok [5].

6. CONCLUSIONES

A partir del presente trabajo de revisión de la literatura sobre el análisis de la eficiencia y condiciones de operación de combustibles basados en etanol en motores de combustión interna, se llegaron a las siguientes conclusiones:

- A mayor contenido de etanol, mayor el número de octanos. Lo que implica menor susceptibilidad al efecto *knocking*.
- Se logró identificar la importancia de la razón de compresión en el motor. Al mismo tiempo, se verificó que la gasolina tiene menos posibilidades de comprimirse, mientras que con etanol las posibilidades aumentan.
- Gracias a una mayor capacidad de compresión en las mezclas gasolina-etanol, el torque, aumentó respecto a la gasolina. Además, el BSFC bajó y se tuvo mayor ventaja al momento de alcanzar el MBT.
- La potencia de frenado mejora con el incremento de etanol en la mezcla del combustible, lo que implica mayor eficiencia térmica a mayor contenido de etanol.
- El etanol es una fuente de combustible más amigable con el medio ambiente comparado a la gasolina. En la literatura se observó que, con el incremento del porcentaje de etanol en la muestra, disminuyen las emisiones de los gases de combustión.

- De acuerdo a la literatura, no se requieren grandes cambios en un motor para que este pueda empezar a ser utilizado con mezclas gasolina-etanol.
- Se observa una tendencia de corroer ciertas partes del motor el doble de rápido que la gasolina convencional con mezclas gasolina etanol E50 o superior.

REFERENCIAS

- [1] L. Razon, “Sin la subvención, el diésel y la gasolina triplicarían sus precios,” 2022. <https://www.larazon.com/economia/2022/12/18/sin-la-subvencion-el-diesel-y-la-gasolina-triplicarian-sus-precios/>.
- [2] P. Castillo-Hernández, A. Mendoza-Domínguez, and P. Caballero-Mata, “Análisis de las propiedades fisicoquímicas de gasolina y diesel mexicanos reformulados con Etanol Analysis of Physicochemical Properties of Mexican Gasoline and Diesel Reformulated with Ethanol,” *Ing. Investig. y Tecnol.*, vol. 13, no. número 3, pp. 293–306, 2012.
- [3] P. Geng, R. Furey, and A. Konzack, “Calculation of heating value for gasoline containing ethanol,” *SAE Tech. Pap.*, vol. 3, no. 2, pp. 229–237, 2010, doi: 10.4271/2010-01-1517.
- [4] Y. Barakat, E. N. Awad, and V. Ibrahim, “Fuel consumption of gasoline ethanol blends at different engine rotational speeds,” *Egypt. J. Pet.*, vol. 25, no. 3, pp. 309–315, 2016, doi: 10.1016/j.ejpe.2015.07.019.
- [5] T. S. Kumar and B. Ashok, “Corrosion behaviour analysis of SI engine components for ethanol-gasoline blends in flex fuel vehicular application,” *Fuel Process. Technol.*, vol. 240, no. September 2022, p. 107574, 2023, doi: 10.1016/j.fuproc.2022.107574.
- [6] N. Turkoz, B. Erkus, M. I. Karamangil, A. Surmen, and N. Arslanoglu, “Experimental investigation of the effect of E85 on engine performance and emissions under various ignition timings,” *Fuel*, 2013, doi: 10.1016/j.fuel.2013.03.009.
- [7] L. V. Amaral, N. D. S. A. Santos, V. R. Roso, R. de C. de O. Sebastião, and F. J. P. Pujatti, “Effects of gasoline composition on engine performance, exhaust gases and operational costs,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 135, no. July 2019, 2021, doi: 10.1016/j.rser.2020.110196.
- [8] H. S. Yücesu, T. Topgül, C. Çinar, and M. Okur, “Effect of ethanol-gasoline blends on engine performance and exhaust emissions in different compression ratios,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 26, no. 17–18, pp. 2272–2278, 2006, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2006.03.006.
- [9] R. C. Costa and J. R. Sodr , “Compression ratio effects on an ethanol/gasoline fuelled engine performance,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 31, no. 2–3, pp. 278–283, 2011, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2010.09.007.
- [10] M. K. Mohammed, H. H. Balla, Z. M. H. Al-Dulaimi, Z. S. Kareem, and M. S. Al-Zuhairy, “Effect of ethanol-gasoline blends on SI engine performance and emissions,” *Case Stud. Therm. Eng.*, vol. 25, no. May 2020, p. 100891, 2021, doi: 10.1016/j.csite.2021.100891.
- [11] X. Li *et al.*, “Numerical investigation on implementing Oxy-Fuel Combustion (OFC) in an ethanol-gasoline Dual-Fuel Spark Ignition (DFSI) engine,” *Fuel*, vol. 302, no. May, p. 121162, 2021, doi: 10.1016/j.fuel.2021.121162.
- [12] J. Zapata-Mina, A. Restrepo, C. Romero, and H. Quintero, “Exergy analysis of a diesel engine converted to spark ignition operating with diesel, ethanol, and gasoline/ethanol blends,” *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 42, no. June, p. 100803, 2020, doi: 10.1016/j.seta.2020.100803.
- [13] M. Eyidogan, A. N. Ozsezen, M. Canakci, and A. Turkcan, “Impact of alcohol-gasoline fuel blends on the performance and combustion characteristics of an SI engine,” *Fuel*, vol. 89, no. 10, pp. 2713–2720, 2010, doi: 10.1016/j.fuel.2010.01.032.
- [14] V. Gnanamoorthi and G. Devaradjane, “Effect of compression ratio on the performance, combustion and emission of DI diesel engine fueled with ethanol - Diesel blend,” *J. Energy Inst.*, vol. 88, no. 1, pp. 19–26, 2015, doi: 10.1016/j.joie.2014.06.001.
- [15] O. Folayan and Y. Pam, “Influence of compression ratio on the performance characteristics of a spark ignition engine,” *Pelagia Res. Libr. Adv. Appl. Sci. Res.*, vol. 2012, no. 4, pp. 1915–1922, 2012, [Online]. Available: www.pelagiaresearchlibrary.com.
- [16] X-engineer.org, “Brake Specific Fuel Consumption (BSFC) – x-engineer.org.” <https://x-engineer.org/brake-specific-fuel-consumption-bsfc/>.
- [17] A. Verma, N. S. Dugala, and S. Singh, “Experimental investigations on the performance of SI engine with Ethanol-Premium gasoline blends,” *Mater. Today Proc.*, vol. 48, no. xxxx, pp. 1224–1231, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2021.08.255.
- [18] J. Magnusson, “An Investigation of Maximum Brake Torque Timing based on Ionization Current Feedback,” 2007.
- [19] A. Boretti, “Analysis of design of pure ethanol engines,” *SAE Tech. Pap.*, pp. 1–13, 2010, doi: 10.4271/2010-01-1453.
- [20] B. Performance, “Flex Fuel Conversion - How To Make A Car Go From E15 to E85.” <https://www.bellperformance.com/blog/bid/112982/Flex-Fuel-Conversion-How-To-Make-A-Car-Go-From-E15-to-E85>.