

Artículo Original

Simulación del performance de motores de combustión interna con mezcla gasolina-etanol en el contexto boliviano

Simulation of the performance of internal combustion engines with gasoline-ethanol blends in the Bolivian

Benjamin Quispe Condori^{1*} · Gonzalo Murillo Coca¹ · Rene Ulises Terán Ballesteros¹ ·
Josué Guerreros Colque¹ · Hipólito Chungara Santillán¹ · Jaime Villafuerte Garabito²

¹ Universidad Nacional "Siglo XX", Carrera de Ingeniería Mecánica Automotriz, Llagagua, Bolivia

² Universidad Mayor de San Andrés, UMSA, Facultad de Tecnología, Departamento de Materia Básicas, La Paz, Bolivia

* Autor de correspondencia: estubenjima@gmail.com

Recibido: 12/05/2025 Aceptado para publicación: 12/06/2025

Resumen

El estudio, analizó los efectos del uso de las mezclas de gasolina y etanol en motores de combustión interna (MCI), enfocándose en la potencia efectiva, el consumo específico de combustible, a partir de la relación estequiométrica (λ) y el poder calorífico, para lo cual se desarrolló una ecuación que permite determinar la relación estequiométrica para diferentes proporciones de mezcla. Se utilizaron tres motores: Toyota 1AZ-FSE (inyección directa, 2000cc), Nissan HR15 (inyección convencional, 1500cc), Toyota 5E-FE este último para la modelación matemática. Para pruebas de funcionamiento los combustibles evaluados fueron gasolina pura y una mezcla de gasolina con 12% de etanol (E12). Los resultados de la modelación matemática muestran que, a mayor contenido de etanol, disminuye la relación estequiométrica, lo que implica menor necesidad de aire para la combustión y mayor consumo de combustible para mantener el rendimiento volumétrico. En cuanto a la potencia efectiva, el motor 5E-FE alcanzó 68 kW con gasolina y 65 kW con E12 a 5500rpm respectivamente. El consumo específico aumentó de 190 g/kW·h con gasolina pura a 200 g/kW·h con E12. Además, el poder calorífico del gasohol (42243 kJ/kg) fue inferior al de la gasolina (43950 kJ/kg), lo que reduce la eficiencia energética. Estos resultados, sugieren que el aumento de etanol afecta negativamente la potencia y eficiencia del motor, destacando la necesidad de optimizar la proporción de etanol en la mezcla y la gestión electrónica para mejorar el rendimiento de los MCI en Bolivia.

Palabras clave: etanol; combustión interna; gasohol; potencia efectiva, modelación matemática

Abstract

The study analyzed the effects of using gasoline-ethanol blends in internal combustion engines (ICEs), focusing on effective power, specific fuel consumption (based on the stoichiometric ratio λ) and calorific value. An equation was developed to determine the stoichiometric ratio for different mixture proportions. Three engines were used: Toyota 1AZ-FSE (direct injection, 2000cc), Nissan HR15 (conventional injection, 1500cc), and Toyota 5E-FE, the latter for mathematical modeling. For operational tests, the fuels evaluated were pure gasoline and a gasoline blend with 12% ethanol (E12). The results of the mathematical modeling show that higher ethanol content lowers the stoichiometric ratio, implying a lower need for air for combustion and higher fuel consumption to maintain volumetric efficiency. In terms of effective power, the 5E-FE engine reached 68 kW with gasoline and 65 kW with E12 at 5500 rpm, respectively. Specific fuel consumption increased from 190 g/kW h with pure gasoline to 200 g/kW h with E12. Furthermore, the calorific value of gasohol (42,243 kJ/kg) was lower than that of gasoline (43,950 kJ/kg), which reduces fuel efficiency. These results suggest that the increase in ethanol negatively affects engine power and efficiency, highlighting the need to optimize the ethanol blend ratio and electronic fuel management to improve the performance of ICEs in Bolivia.

Keywords: ethanol; internal combustion; gasohol; effective power; mathematical simulation

Introducción

La 28ª Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (COP28), celebrada en Expo City, Dubái, puso en evidencia la urgencia de abordar el calentamiento global, impulsado en gran medida por el uso indiscriminado de combustibles fósiles (United Nations Framework Convention on Climate Change, 2023). En este contexto, Qatar, uno de los principales productores de petróleo, anunció su decisión de reducir progresivamente su dependencia de estos recursos (Dumoulin Andre, 2024). Entre los compromisos clave de la cumbre se incluyó la meta de triplicar la capacidad mundial de energías renovables para 2030 y acelerar la transición hacia sistemas con emisiones netas cero antes de mediados de siglo, promoviendo así el abandono progresivo de los combustibles fósiles (Seneviratne, 2024).

En Bolivia, desde inicios de 2023, la escasez de combustibles se ha convertido en un problema recurrente debido a diversos factores, como la disminución de la producción nacional, políticas ineficientes de exploración, la falta de divisas para la importación de combustibles, el contrabando hacia países vecinos y dificultades logísticas en el transporte (Gaceta Oficial del Estado Plurinacional de Bolivia, 2024). Ante esta situación y con el objetivo de reducir los costos de la subvención estatal a los combustibles, el Gobierno promulgó en 2018 el Decreto Supremo N° 3672, estableciendo la mezcla de etanol anhidro con gasolinas base en proporciones de hasta el 12% para su comercialización (Gaceta Oficial del Estado Plurinacional de Bolivia, 2024).

A nivel mundial, la tendencia es la reducción gradual del uso de combustibles fósiles mediante la incorporación de biocombustibles. En este sentido, varios países han implementado mezclas de gasolina con etanol, denominadas GASOHOL, en proporciones que varían desde el 5% hasta el 85% (Bravo Coral, 2022). Bolivia produce bioetanol a partir de la caña de azúcar y, más recientemente, la empresa Granosol S.A., ubicada en Pailón, Santa Cruz, ha diversificado la producción utilizando sorgo, exportándolo a la Comunidad Económica Europea y países del Bloque Andino (Delius, 2008).

Estudios previos han evaluado el impacto del etanol en motores de combustión interna, una investigación del Instituto de Investigaciones Mecánicas y Electromecánica de la Universidad Mayor de San Andrés (UMSA) concluyó que el uso de hasta un 25% de etanol anhidro no afecta la vida útil del motor y puede mejorar su rendimiento. Sin embargo, en la práctica, se han reportado problemas como dificultades de encendido en climas fríos, mayor consumo de combustible, pérdida de potencia y deterioro de los componentes del sistema de inyección, especialmente en motores con sistema de alta presión como el GDI. Estas complicaciones pueden estar relacionadas con el contenido de agua en el etanol, su poder calorífico, la relación estequiométrica de la mezcla y la gestión electrónica del motor.

Por tanto, en el presente estudio el objetivo es analizar de manera teórica los efectos del uso de mezclas de gasolina y etanol en distintas proporciones. A partir de modelos matemáticos y pruebas de funcionamiento en vehículos, se evaluarán los impactos en la potencia efectiva y el consumo de combustible. En este contexto, surge la pregunta de investigación: ¿Cómo influyen la relación estequiométrica y el poder calorífico de la mezcla de gasolina-etanol en diferentes proporciones en la potencia efectiva y el consumo de combustible de los motores de combustión interna? La respuesta a esta interrogante permitirá identificar tanto los beneficios como las limitaciones de esta alternativa energética.

Materiales y métodos

Evaluación de combustión interna

Para el estudio, se emplearon tres motores de combustión interna; un motor Toyota 1AZ-FSE con inyección directa y cilindrada de 2000cc VVT-I, un motor Nissan HR15 con inyección convencional y cilindrada de 1500cc, y un motor Toyota 5E-FE, utilizado exclusivamente para la modelación matemática de potencia y consumo (Tabla S1). Los combustibles utilizados fueron; gasolina (pura) y etanol (12% = E12) disponible en Bolivia. Para medir las variables clave, se utilizaron instrumentos como; sensor Lambda (determinar la relación aire-combustible), escáner automotriz bidireccional (monitorea en tiempo real el sistema electrónico), y manómetro (mide la presión de combustible en el sistema Common Rail). Además, se emplearon herramientas como software de cálculo matemático, una cámara fotográfica para documentar el deterioro del sistema de combustible y programas estadísticos para el procesamiento y análisis de resultados mediante hojas de cálculo.

Monitoreo de vehículos

El monitoreo de vehículos de combustión interna que operan con mezclas de gasolina-etanol, fueron seleccionados a partir de diferentes sistemas de alimentación de combustible: un Nissan Note 2008 con inyección convencional (motor HR15), un Toyota Voxel con inyección directa (GDI, motor 1AZ-FSE) y un Toyota Caldina con motor 5E-FE de 1550cc. Se utilizaron mezclas de gasolina y etanol en proporciones E10 y E12, con énfasis en las mezclas comunes en Bolivia, además de gasolina pura. Se observó que los motores con inyección directa presentaron problemas de obstrucción de inyectores, causados por un sedimento blanco que provoca cortocircuitos y el colapso del embobinado del inyector, mientras que los motores con sistema convencional no mostraron fallas graves, más allá del deterioro de los sellos de los inyectores.

Variables de análisis

Se seleccionaron tres vehículos con diferentes tipos de sistemas de alimentación de combustible: un Nissan Note 2008 con inyección convencional (motor HR15), un Toyota Voxel con sistema GDI (motor 1AZ-FSE) y un Toyota Caldina con motor 5E-FE de 1550cc. Para el estudio, se utilizaron diversas proporciones de gasolina y etanol (E10, E12), con especial énfasis en las mezclas comunes en Bolivia, además de gasolina pura. Además, las variables independientes fueron las proporciones de mezcla de gasolina-etanol y sistemas de alimentación de combustible, mientras que las variables dependientes incluyeron la relación estequiométrica, el poder calorífico, el consumo específico y la potencia efectiva del motor y el torque (Tabla S2-S3).

Registro mecánico y operacional

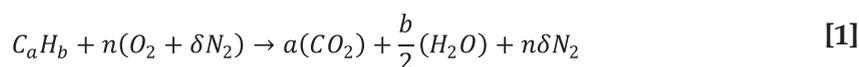
El desgaste mecánico y operacional de los motores fue evaluado mediante una inspección detallada. Se verificó que los componentes mecánicos clave, como válvulas, pistones y el múltiple de admisión, no presentaron signos de deterioro significativo a corto y mediano plazo. No obstante, el sistema de combustible del motor Toyota 1AZ-FSE con inyección directa mostró signos de desgaste, especialmente en el alojamiento de los inyectores y el riel común (Figura S1), lo que resultó en la obstrucción completa del inyector #1 y parcial del inyector #2, debido a la entrada incorrecta del combustible presurizado.

Evaluación de encendido y consumo

En los vehículos con sistema convencional de inyección (motor HR15), se evidenció un retardo en el encendido en frío, especialmente en regiones donde las temperaturas cercanas a 0°C afectaban el arranque del motor. Este problema fue más pronunciado durante las temporadas de otoño e invierno, lo que provocó un mayor desgaste de la batería y el motor de arranque. Además, el uso de combustibles con etanol amplificó el impacto en el sistema de encendido, destacando la necesidad de optimizar las mezclas de combustible y los sistemas de arranque en condiciones de bajas temperaturas para reducir el desgaste operacional y mejorar la eficiencia energética de los motores.

Modelación estequiométrica de combustible

La siguiente expresión matemática, detalla la combustión completa de aire combustible y los restos de la combustión en proporciones moleculares:



Donde:

a = Cantidad de carbono en función al tipo de combustible

b = Cantidad de hidrogeno en función al tipo de combustible

n = Moles de oxígeno requeridos para la combustión completa ; $n = a + \frac{b}{4}$

δ = Relación molar del aire seco

$$\delta = \frac{78,533}{21,467} = 3,6583$$

Con la siguiente expresión matemática se determina la relación estequiométrica de cualquier tipo de combustible de la familia de los alcanos derivados del petróleo:

$$\lambda = \frac{\text{Masa de aire}}{\text{Masa de combustible}}$$

$$\lambda = \frac{n(M_{O_2} + \delta M_{N_2})}{aM_C + bM_H} \quad [2]$$

Para el caso de gasolina considerado un octano C_8H_{18}

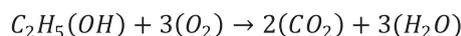
La relación estequiométrica es:

$$\lambda = \frac{\left(a + \frac{b}{4}\right) (O_2 + \delta N_2)}{C_a H_b} \quad [3]$$

$$\lambda = \frac{\left(8 + \frac{18}{4}\right) (2 \cdot 16 + 3.6583 \cdot 2 \cdot 14.02)}{8 \cdot 12.01 + 18 \cdot 1.01}$$

$$\lambda = 14.723 \frac{gr_{Aire}}{gr_{Gasolina}}$$

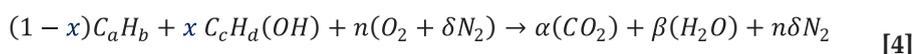
El etanol es un compuesto químico que pertenece a la familia de los alcoholes también denominado como alcohol etílico y se obtiene, a partir, de la fermentación de materias vegetales ricas en azúcares como la caña de azúcar, el maíz o el sorgo, su fórmula química es $C_2H_5(OH)$. Ecuación básica de la combustión:



Gasohol (mezcla de x % etanol y $(100 - x)$ % gasolina)

Desarrollo de la ecuación para el cálculo de relación estequiométrica combustibles vs aire

Para el calcular la relación estequiométrica de la mezcla gasolina-etanol (gasohol) vs aire se debe considerar las ecuaciones de la combustión de ambos combustibles. Considerando una mezcla de x % etanol y $(100-x)$ % gasolina). La ecuación de combustión general será:



Determinación de variables para la ecuación

Donde:

$$\alpha = (1 - x)a + xc$$

$$\beta = \frac{(1 - x)b + x(d + 1)}{2}$$

$$n = \left((1 - x)a + xc + \frac{(1 - x)b + x(d + 1)}{4} \right) - \frac{x}{2}$$

$$n = \alpha + \frac{\beta}{2} - \frac{x}{2}$$

$$\delta = \frac{78.533 \% N_2}{21.467 \% O_2} = 3.658$$

Calculo estequiométrica del Gasohol

Con la siguiente ecuación se podrá determinar el valor de la relación estequiométrica de cualquier proporción de la mezcla gasolina-etanol:

$$\lambda = \frac{n(M_{O_2} + \delta M_{N_2})}{(1-x)M_{C_aH_b} + xM_{C_cH_d(OH)}} \quad [5]$$

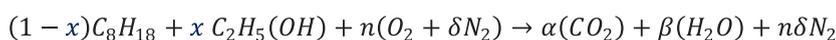
$$\lambda = \frac{\left((1-x)a + x c + \frac{(1-x)b + x(d+1)}{4} \right) - \frac{x}{2} \left(M_{O_2} + \delta M_{N_2} \right)}{(1-x)M_{C_aH_b} + xM_{C_cH_d(OH)}} \quad [6]$$

Calculo estequiométrica Gasohol vs aire

Considerando una mezcla de 10 % etanol y 90% gasolina:

10 % de etanol
100%-10%) de gasolina

Dada la expresión para la combustión completa del gasohol:



Relación estequiométrica para la gasolina E10

$$\lambda = \frac{n(M_{O_2} + \delta M_{N_2})}{(1-0.1)M_{C_8H_{18}} + 0.1 \cdot M_{C_2H_5(OH)}}$$

Cálculo del valor de n $n = \left((1-0.1) \cdot 8 + 0.1 \cdot 2 + \frac{(1-0.1) \cdot 18 + 0.1(5+1)}{4} \right) - \frac{0.1}{2}$

$$n = 11.55$$

$$\lambda = \frac{11.55 \cdot (M_{O_2} + \delta M_{N_2})}{(1-0.1)M_{C_8H_{18}} + 0.1 \cdot M_{C_2H_5(OH)}}$$

$$\lambda = \frac{11.55 \cdot (M_{O_2} + 3.658 \cdot M_{N_2})}{0.9 \cdot M_{C_8H_{18}} + 0.1 \cdot M_{C_2H_5(OH)}}$$

$$\lambda = \frac{11.55 \cdot (2 \cdot 16 + 3.658 \cdot 2 \cdot 14.02)}{0.9 \cdot (8 \cdot 12.01 + 18 \cdot 1.01) + 0.1 \cdot (2 \cdot 12.01 + 5 \cdot 1.01 + 16 + 1.01)}$$

$$\lambda = 14.4663$$

Determinación poder calorífico del gasohol

Las propiedades del poder calorífico del combustible (Tabla 1), el etanol tiene una menor densidad energética en comparación con la gasolina resultado a partir de la ecuación 7 y 8, lo que significa que proporciona menos energía por volumen. Sin embargo, el etanol tiene un mayor octanaje, lo que puede mejorar la eficiencia y el rendimiento de los motores, además permitiendo el aumento de la relación de compresión.

Tabla 1. Poder calorífico de los combustibles

Combustible	Poder calorífico inferior $\frac{kJ}{kg}$	Poder calorífico superior $\frac{kJ}{kg}$
Gasolina	43950	46885
Etanol	26790	29720

Fuentes: Eurostat, AIE y Resolución de la Secretaría de Estado de Energía 2013

Calculo del poder calorifio de la mezcla gasolina etanol

$$PCS_{Gasohol} = (1 - x)PCS_G + xPCS_E \quad [7]$$

$$PCI_{Gasohol} = (1 - x)PCI_G + xPCI_E \quad [8]$$

Determinación de poder calorífico de mezcla 10% etanol

$$PCS_{Gasohol} = (1 - 0.1) \cdot 46885 \frac{kJ}{kg} + 0.1 \cdot 29720 \frac{kJ}{kg} = 45191.5 \frac{kJ}{kg}$$

$$PCI_{Gasohol} = (1 - 0.1) \cdot 43950 \frac{kJ}{kg} + 0.1 \cdot 26790 \frac{kJ}{kg} = 42243 \frac{kJ}{kg}$$

Determinación del consumo específico de combustible

Para determinar el consumo específico de combustible, se consideraron factores clave como la relación estequiométrica, el poder calorífico y las características del motor. Utilizando los valores obtenidos mediante la modelación matemática, se calculó el consumo específico con el apoyo de un software de simulación de datos. Es importante señalar que estos valores se derivaron de una simulación teórica basada en los datos reales del motor 5E-FE.

Medición y determinación de la potencia efectiva del motor

La potencia efectiva es la potencia real de salida, y depende de factores como la relación estequiométrica, el poder calorífico y las características del motor. Utilizando los valores obtenidos mediante la modelación matemática, se determinó la potencia efectiva mediante un software de simulación de datos (anexos: Grafico 1, anexo 2 y anexo 3). Es importante señalar que estos valores fueron obtenidos a partir de una simulación teórica, basada en los datos reales del motor 5E-FE.

Resultados

Se desarrollo una ecuación con diferentes variables para la combustión completa, como se observa en la ecuación (5) lo cual nos permite determinar la relación estequiométrica para cualquier proporción de la mezcla gasolina etanol; mediante este alcance se efectuó la modelación matemática; para evaluar el comportamiento de los motores de combustión interna así como la potencia, consumo específico, el torque operando con diferentes proporciones de mezcla gasolina etanol además considerando las condiciones geográfica de Bolivia.

Proporciones de la mezcla Gasolina-Etanol

Los resultados presentados en la Tabla 2, muestran la relación estequiométrica para diferentes proporciones de la mezcla de gasolina-etanol. A medida que aumenta el contenido de etanol en la mezcla, se observa una disminución de la relación estequiométrica para la combustión completa (λ), lo que en teoría indica una menor cantidad de oxígeno necesario para la combustión completa y un aumento en la inyección de combustible para alcanzar el rendimiento volumétrico inicial del motor (llenado del cilindro con mezcla fresca). En particular, las mezclas con mayor porcentaje de etanol (como

E85) requieren un menor valor de n (4.425), por ende, una reducción de la relación estequiométrica lo que implica que el motor necesitará una menor cantidad de aire para mantener la combustión completa, pero esto directamente afecta al rendimiento volumétrico lo cual indica de no existe un llenado suficiente de aire, para compensar se debe inyectar una mayor cantidad de combustible lo cual traduce en un mayor consumo.

En cambio, las mezclas con menos cantidad de etanol, como E10 y E12, presentan valores de n más altos (11.55 y 11.36, respectivamente) y el valor de (λ) , (14,4663 y 14,411) lo que sugiere una mayor necesidad de aire para la combustión y un mayor llenado del cilindro (buen rendimiento volumétrico). Estos resultados resaltan cómo el aumento del etanol afecta la eficiencia de la combustión y el requerimiento de oxígeno en el proceso.

Tabla 2. Relación estequiométrica para diferentes proporciones de la mezcla Gasolina-Etanol

Tipo de mezcla	Factor de igualación para la combustión completa n	Relación estequiométrica λ
E10 (10% etanol)	11.55	14.4663
E12 (12% etanol)	11.36	14.411
E20 (20% etanol)	10.6	14.176
E50 (50% etanol)	7.75	13.009
E85 (85% etanol)	4.425	10.575

Potencia efectiva y consumo específico de combustible

A partir de los parámetros y formulaciones efectuadas con los modelos matemáticos, se obtuvieron los siguientes resultados: Las Figuras 2 y 3 generados, reflejan el análisis estadístico y la modelación matemática aplicada a los datos obtenidos de un motor 5E-FE. En particular, los resultados están relacionados con la potencia efectiva y el consumo específico de combustible. En la Figura 2, muestra la potencia efectiva de un motor operando con ambos combustibles, se observa que el motor Toyota 5E-FE, diseñado para operar únicamente con gasolina convencional, alcanza una potencia máxima de 68 kW a 5500 rpm, según el catálogo. Sin embargo, cuando se opera con una mezcla de 12% de etanol, se presenta una disminución apreciable, aunque pequeña, en la potencia, alcanzando un máximo de 65 kW a 5500 rpm. A bajas revoluciones, la potencia es prácticamente igual con ambos combustibles hasta los 3000 rpm, donde comienza a notarse la ligera diferencia.

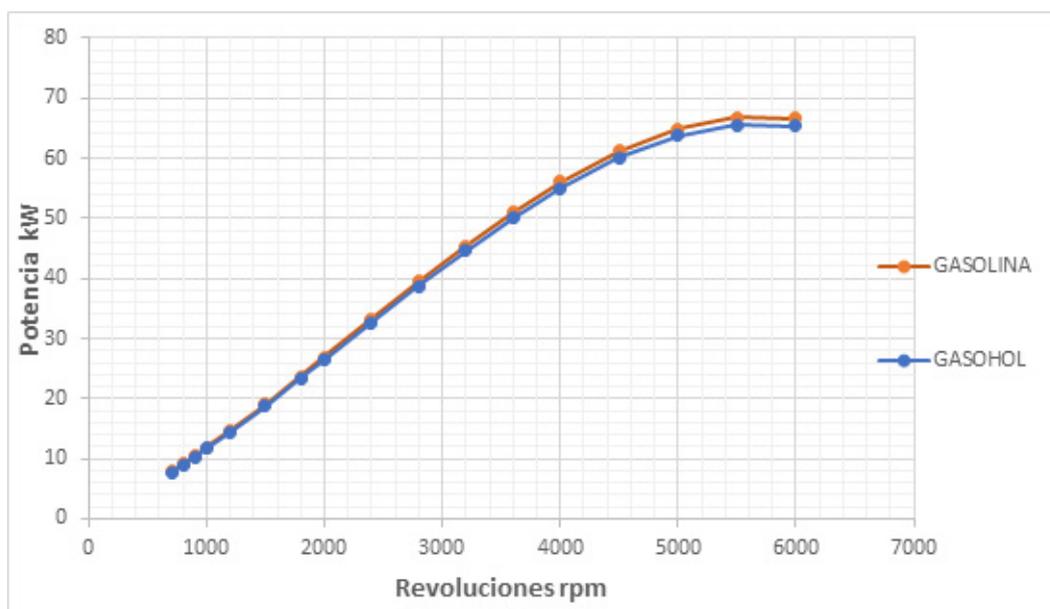


Figura 1. Potencia efectiva de un motor operando con ambos combustibles

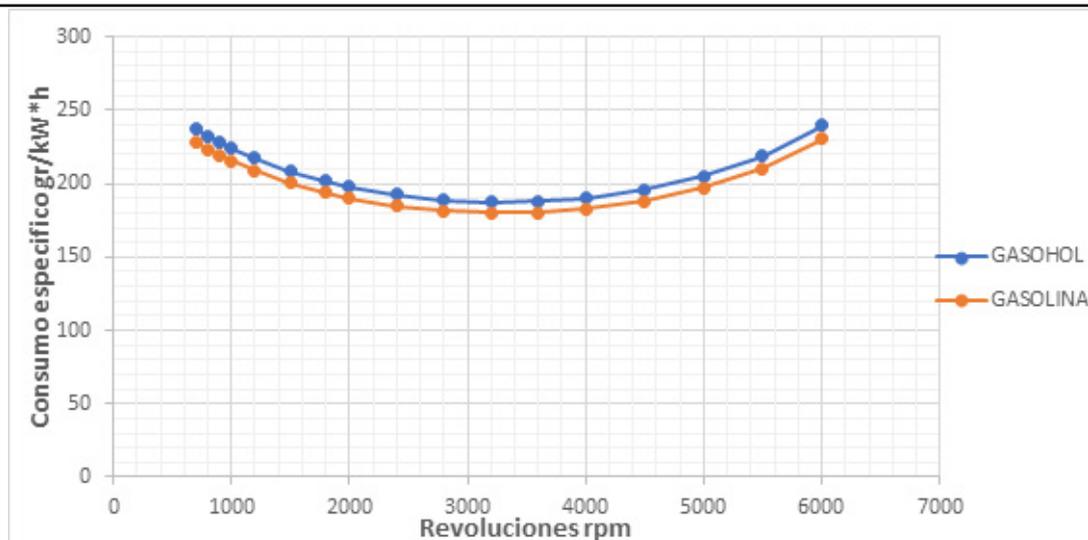


Figura 2. Consumo específico de un motor operando con ambos combustibles

Tabla 3. Poder calorífico de los combustibles

Combustible	Poder calorífico inferior $\frac{kJ}{kg}$	Poder calorífico superior $\frac{kJ}{kg}$
Gasolina	43950	46885
Etanol	26790	29720
Gasohol	42243	45191.5

El motor Toyota 5E-FE, modelo 1994, diseñado para operar exclusivamente con gasolina convencional, según el manual del propietario y los cálculos termodinámicos, presenta un consumo específico promedio de 190 g/kW·h (Figura 3). Sin embargo, cuando opera con gasohol E12, el consumo específico promedio aumenta a 200 g/kW·h, registrando los valores más bajos de consumo a 3200 rpm. En el gráfico se puede observar un ligero aumento en el consumo de combustible cuando el motor opera con gasohol en comparación con la gasolina convencional.

Discusión

Los resultados obtenidos en nuestro estudio, coinciden con los hallazgos de la Universidad Mayor de San Andrés (UMSA), que indican que las mezclas de etanol con hasta un 15% no afectan significativamente el rendimiento de los vehículos en Bolivia. Sin embargo, a medida que se aumenta el porcentaje de etanol en la mezcla, como se observa en los resultados de la Tabla 2, se experimenta una disminución en el factor de igualación para la combustión completa (n) por ende reduce la relación estequiométrica. Esto implica que, al aumentar el contenido de etanol, el motor requiere menos oxígeno para completar la combustión, en teoría parece excelentes resultados (Manzetti, S., Andersen, O., 2015), para inferir datos de potencia y consumo, pero en la práctica esto afecta directamente en el rendimiento volumétrico. Este fenómeno está directamente relacionado con una menor eficiencia de la combustión a medida que el etanol aumenta en la mezcla, lo cual ha sido documentado en investigaciones previas sobre combustibles con etanol (Varde y Manoharan, 2009, Ahlawat, A., 2024).

En cuanto a la potencia efectiva, los resultados obtenidos en la Figura 2 muestran que, aunque el motor Toyota 5E-FE, diseñado para funcionar exclusivamente con gasolina convencional, alcanza una potencia máxima de 68 kW a 5500 rpm, al operar con una mezcla de 12% de etanol (gasohol E12), la potencia máxima disminuye a 65 kW. Aunque la disminución es pequeña, resulta apreciable y refleja la tendencia observada en otros estudios, que indican que el etanol puede reducir la potencia de los motores, especialmente aquellos que no están diseñados para adaptarse a combustibles con alto contenido de etanol (Nuñez y Önal, 2016). No obstante, a bajas revoluciones (hasta los 3000 rpm), la potencia es prácticamente igual con ambos combustibles, lo que sugiere que el impacto del etanol en la potencia es más significativo a altas revoluciones.

El análisis del consumo específico de combustible, mostrado en la Figura 3, también confirma esta tendencia. El motor, que en su configuración original presenta un consumo específico de 190 g/kW·h, experimenta un aumento al operar con gasohol E12, alcanzando un consumo específico promedio de 200 g/kW·h. Este incremento refleja la menor eficiencia energética del etanol, tal como se observa en los resultados de la Tabla 3. A medida que aumenta la proporción de etanol en la mezcla, el poder calorífico de la mezcla disminuye, lo que implica que el motor debe consumir más combustible para generar la misma cantidad de potencia. Este fenómeno es ampliamente reconocido en la literatura como una de las principales desventajas del uso de etanol en combustibles (Walls, Rusco y Kendix, 2011).

En relación con el poder calorífico de los combustibles, los resultados obtenidos en la Tabla 3 confirman que tanto el poder calorífico inferior como el superior del etanol son considerablemente más bajos que los de la gasolina. Esta menor densidad energética se traduce en una pérdida de potencia y un aumento en el consumo de combustible cuando se utiliza gasohol. De hecho, a medida que la proporción de etanol en la mezcla aumenta (E50 y E85), la reducción en la densidad energética es aún más pronunciada. Esto afecta negativamente el rendimiento del motor, provocando un retardo en el encendido y una reacción más lenta del motor al acelerar. Estos efectos son más evidentes en vehículos que no cuentan con sistemas avanzados de control como los vehículos Flex Fuel, que están equipados con sensores que ajustan automáticamente el rendimiento del motor en función de la mezcla de combustible utilizada (Chandra et al., 2018).

Finalmente, al considerar la implementación de combustibles de etanol en Bolivia, es crucial evaluar tanto los beneficios como los desafíos asociados. Si bien las mezclas de etanol presentan ventajas ambientales, como la reducción de las emisiones de CO, también traen consigo desventajas en términos de rendimiento del motor y eficiencia energética, especialmente en vehículos sin sistemas avanzados de control. Como sugieren diversos estudios (Santana, C., Barros, J., Almeida Junior, H., 2022; Varde y Manoharan, 2009), es necesario llevar a cabo pruebas adicionales y desarrollar políticas públicas que contemplen estos efectos antes de promover el uso generalizado de mezclas de etanol en el país. Además, la infraestructura adecuada, la disponibilidad de vehículos Flex Fuel y el manejo de la producción agrícola para la obtención de etanol son factores clave a considerar para una transición exitosa hacia combustibles más sostenibles.

Conclusiones

Los resultados de nuestro estudio, muestran que a medida que aumenta el porcentaje de etanol en la mezcla, se reduce la eficiencia energética del gasohol, la relación estequiométrica, como consecuencia un bajo rendimiento volumétrico, afectando negativamente a la eficiencia de la combustión, lo que provoca una pérdida de potencia y un aumento en el consumo de combustible. Aunque el etanol reduce las emisiones de CO₂ y la dependencia del petróleo, su menor poder calorífico afecta negativamente el rendimiento de los motores, especialmente en aquellos sin sistemas avanzados como los vehículos Flex Fuel. Estos hallazgos resaltan la necesidad de pruebas adicionales y una infraestructura adecuada para promover el uso de combustibles más sostenibles en Bolivia.

Agradecimientos

Agradecemos a la Carrera Ingeniería Mecánica Automotriz y EMANUEL INC. División automotriz. Por brindar los espacios del taller y laboratorio para realizar las pruebas experimentales y monitoreo del caso y por haber contribuido con el seguimiento de los efectos que trae el uso del Gasohol.

Declaración de conflicto de interés

Los autores declaramos que no tenemos conflictos de interés

Contribuciones de los autores

B.Q.C. lideró la conceptualización, el modelo matemático, la metodología, la simulación y la redacción inicial. **G.M.C.** recolectó muestras de combustibles, validó la simulación y editó el manuscrito. **R.U.T.B.** aportó datos técnicos de motores y apoyo en la revisión. **J.G.C.** programó la simulación, analizó datos y revisó el apartado estadístico. **H.C.S.** supervisó el proyecto y ajustó la metodología. **J.V.G. y B.Q.C.** coordinaron al equipo, validaron muestras y aprobaron la versión final.

Referencias

- Agarwal, A. K. (2007). Biofuels (alcohols and biodiesel) applications as fuels for internal combustion engines. *Progress in Energy and Combustion Science*, 33, 233–271. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2006.08.003>
- Ahlatwat, A. (2024). Emission and pollutants analysis using ethanol-gasoline blends for single cylinder four stroke petrol engines. En *Proceedings - 2024 3rd International Conference on Computational Modelling, Simulation and Optimization, ICCMSO 2024* (pp. 377–379). Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. <https://doi.org/10.1109/ICCMO61761.2024.00080>
- Al-Hasan, M. (2003). Effect of ethanol unleaded gasoline blends on engine performance and exhaust emission. *Energy Conversion and Management*, 44, 1547–1561. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(02\)00166-8](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(02)00166-8)
- Allmägi, R., et al. (2023). Ethanol utilization in spark-ignition engines and emission characteristics. En *Green Energy and Technology* (pp. 255–277). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-36542-3_10
- Alsiyabi, A., Stroh, S., & Saha, R. (2021). Investigating the effect of E30 fuel on long term vehicle performance, adaptability, and economic feasibility. *Fuel*, 306, 121629. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121629>
- Bawase, M., & Saraf, M. R. (2017). Systematic evaluation of 20% ethanol gasoline blend (E20) as a potential alternate fuel. *SAE Technical Papers*. <https://doi.org/10.4271/2017-26-0072>
- Gaceta Oficial del Estado Plurinacional de Bolivia. (2024). Decreto Supremo 3672 (50ª ed.). La Paz: Latinas.
- García, C., Manzini, F., & Islas, J. (2010). Air emissions scenarios from ethanol as a gasoline oxygenate in Mexico City Metropolitan Area. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 3032–3040. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.07.011>
- García Mariaca, E. D., Cendales Ladino, A. F., & Eslava Sarmiento (2016). Motores de combustión interna (MCI) operando con mezclas de etanol gasolina: revisión. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 26(1), 75–96. <https://doi.org/10.18359/rcin.1626>
- Lloyd, P. J. (2005). Carbon dioxide emissions from vehicles fuelled with ethanol mixtures. *Journal of Energy in Southern Africa*, 16(3), 137–138. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-28744442027>
- Manzetti, S., & Andersen, O. (2015). A review of emission products from bioethanol and its blends with gasoline. *Fuel*, 140, 293–301. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.09.101>
- Mourad, M., & Mahmoud, K. (2019). Investigation into SI engine performance characteristics and emissions fuelled with ethanol/butanol-gasoline blends. *Renewable Energy*, 143, 762–771. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.05.064>
- Pourkhesalian, A., Shamekhi, A., & Salimi, F. (2010). Alternative fuel and gasoline in an SI engine: A comparative study of performance and emissions characteristics. *Fuel*, 89, 1056–1063. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.11.025>
- Rosdi, S. M., Ghazali, M. F., & Mamat, R. (2025). Evaluation of engine performance and emissions using blends of gasoline, ethanol, and fusel oil. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 11, 101065. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2024.101065>
- Sadeghinezhad, E., Kazi, S. N., Sadeghinejad, F., Badarudin, A., Mehrali, M., Sadri, R., & Reza, M. (2014). A comprehensive literature review of biofuel performance in internal combustion engine and relevant costs involvement. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30, 29–44. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.09.022>
- Santana, C., Barros, J., & de Almeida Junior, H. (2022). Comparative analysis of the internal combustion engine block vibration with gasoline and ethanol fuel. *SAE Technical Paper 2021-36-0010*. <https://doi.org/10.4271/2021-36-0010>
- Stein, R. A., Anderson, J. E., & Wallington, T. J. (2013). An overview of the effects of ethanol-gasoline blends on SI engine performance, fuel efficiency, and emissions. *SAE International Journal of Engines*, 6(1), 470–487. <https://doi.org/10.4271/2013-01-1635>
- Tibaquirá, J. E., et al. (2018). The effect of using ethanol-gasoline blends on the mechanical, energy and environmental performance of in-use vehicles. *Energies*, 11(1), 221. <https://doi.org/10.3390/en11010221>
- United Nations Framework Convention on Climate Change. (2023, noviembre 9). Manual del observador para la COP 28. <https://unfccc.int/sites/default/files/resource/Observer%20Handbook%20for%20COP%2028-Spanish.pdf>
- Varde, K. S., & Manoharan, N. K. (2009). Characterization of exhaust emissions in a SI engine using E85 and cooled EGR. *SAE Technical Papers*. <https://doi.org/10.4271/2009-01-1952>
- Walls, W. D., Rusco, F., & Kendix, M. (2011). Biofuels policy and the US market for motor fuels: Empirical analysis of ethanol splashing. *Energy Policy*, 39(7), 3999–4006. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.12.045>
- Yao, Y.-C., Tsai, J.-H., & Chou, H.-H. (2011). Air pollutant emission abatement using application of various ethanol-gasoline blends in high-mileage vehicles. *Aerosol and Air Quality Research*, 11(5), 547–559. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2011.04.0044>
- Yüksel, F., & Yüksel, B. (2004). The use of ethanol-gasoline blend as a fuel in an SI engine. *Renewable Energy*, 29, 1181–1191. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2003.11.012>
-

Material suplementar

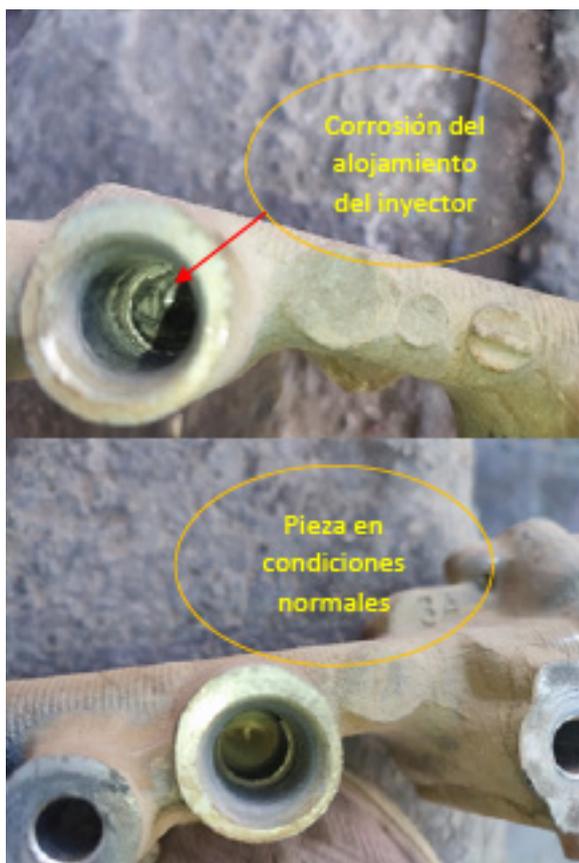


Figura S1. Deterioro del sistema de combustible Common rail GDI Toyota 1AZ-FSE.

Tabla S1. Datos técnicos del motor Toyota 5E-FE y factores de calculo

Diámetro	0,074	M
Carrera	0,0871	m
Rel com	9,4	
Rendim. Meca	0,87	
Numero de cil	4	
Poder cal del gasohol	42243	kJ/kg
R a/c	14,4	kg a/kg c
Pres n mar	1	bar
Densidad del aire	0,95	kg/m3
Temperatura n/m	290	K
Altura	3860	m
Expo adiabata	1,4	
Tem a 3860m	286	K
Gravedad	9,78	m/s2
Constante uni	378	J/kg*K
Rendimiento vo	0,88	
Calor esp a p	1,04	kJ/kg*K
Calor esp a v	0,71	kJ/kg*K

Tabla S2. Determinación de valores tales como la potencia, torque y consumo específico en diferentes unidades de medida del motor 5E-FE operando con gasohol de 12%, se observa una pérdida de performance en comparación al motor operando con gasolina

Potencia teórica Max kW	Rev max rpm	Régimen rpm	Pot efec Real kw	Pot efec Real hp	Pot efec Real Cv	Torque N*m	Consumo especifico gr/Kw*h
53,08284315	5000	700	7,70359453	10,32653422	10,46684039	105,0990397	237,1385427
53,08284315	5000	800	8,979069085	12,03628564	12,19982213	107,1876372	232,5177955
53,08284315	5000	900	10,29063997	13,79442356	13,98184779	109,1951242	228,2430951
53,08284315	5000	1000	11,63575922	15,59753247	15,80945546	111,1215005	224,2863261
53,08284315	5000	1200	14,41645087	19,32500117	19,58756912	114,7309215	217,2303052
53,08284315	5000	1500	18,77540162	25,16809869	25,51005655	119,5367237	208,4968731
53,08284315	5000	1800	23,29869685	31,23149712	31,65583812	123,6125305	201,6222223
53,08284315	5000	2000	26,37155648	35,3506119	35,83091913	125,9241822	197,9209448
53,08284315	5000	2400	32,5631393	43,65032078	44,24339579	129,5741585	192,3457069
53,08284315	5000	2800	38,67998149	51,84984113	52,55432267	131,9263654	188,9162415
53,08284315	5000	3200	44,55901253	59,7305798	60,54213659	132,980803	187,418278
53,08284315	5000	3600	50,03716194	67,07394362	67,98527438	132,7374713	187,7618495
53,08284315	5000	4000	54,95135923	73,66133945	74,66217287	131,1963702	189,9673983
53,08284315	5000	4500	60,05262046	80,49949123	81,59323432	127,4450056	195,5591197
53,08284315	5000	5000	63,69941178	85,38795145	86,54811383	121,6658765	204,8481778
53,08284315	5000	5500	65,57323615	87,89978036	89,09407085	113,8589828	218,8938677
53,08284315	5000	6000	65,35559649	87,60803819	88,79836479	104,0243244	239,5885121

Tabla S3: Determinación de valores tales como la potencia, torque y consumo específico en diferentes unidades de medida del motor 5E-FE operando con gasolina pura.

Potencia teórica Max kW	Rev max rpm	Régimen	Pot efec Real kw	Pot efec Real hp	Pot efec Real Cv	Torque N*m	Consumo específico gr/Kw*h
rpm	Pot efec Real kw	Pot efec Real hp	Pot efec Real Cv	Torque N*m	Consumo específico gr/Kw*h	105,0990397	237,1385427
54,10323	5000	700	7,851678	10,5250371	10,66804	107,11932	227,9178072
54,10323	5000	800	9,15167	12,2676544	12,434334	109,24806	223,47673
54,10323	5000	900	10,48845	14,0595883	14,250615	111,29414	219,3682441
54,10323	5000	1000	11,85943	15,8973576	16,113354	113,25755	215,5653275
54,10323	5000	1200	14,69357	19,696478	19,964093	116,93635	208,7836682
54,10323	5000	1500	19,13631	25,6518951	26,000426	121,83453	200,389821
54,10323	5000	1800	23,74656	31,8318478	32,264346	125,98869	193,7824794
54,10323	5000	2000	26,87849	36,0301427	36,519683	128,34477	190,2251199
54,10323	5000	2400	33,18909	44,4893936	45,093869	132,06491	184,8666658
54,10323	5000	2800	39,42351	52,84653	53,564554	134,46233	181,5705494
54,10323	5000	3200	45,41555	60,878757	61,705914	135,53704	180,1308317
54,10323	5000	3600	50,99901	68,3632794	69,292128	135,28903	180,4610441
54,10323	5000	4000	56,00767	75,0773021	76,097374	133,71831	182,5808338
54,10323	5000	4500	61,20699	82,046901	83,161669	129,89483	187,9551304
54,10323	5000	5000	64,92388	87,0293301	88,211794	124,00461	196,8829991
54,10323	5000	5500	66,83372	89,5894429	90,806691	116,04765	210,3825458
54,10323	5000	6000	66,6119	89,2920927	90,5053	106,02394	230,2725136