

Analysis and Study of Complete Combustion in an Internal Combustion Engine using Different Amounts of Biogas

A. E. Pérez-Ramos , G. Polupan , and Erik Zamora 

Abstract—This article explores the characteristics of biogas, its main composition (methane and carbon dioxide) and its potential to reduce greenhouse gas emissions. This study was carried out using various quantities of biogas, to analyze the main pollutants released by the engine at the end of the combustion process, according to the quantities of biogas that enter the engine. The results we obtained when carrying out the theoretical study show us that increasing the amounts of methane favors the behavior of the engine in various conditions; on the contrary, increasing methane and reducing CO₂ increases the concentrations of pollutants such as CO, SO₂. Biogas has been implemented as an alternative fuel, highlighting its positive impact on energy sustainability and the reduction of operating costs. Finally, we analyze that biogas has great potential to contribute to a cleaner and more sustainable energy future if current barriers are overcome.

Link to graphical and video abstracts, and to code:
<https://latam.ieeer9.org/index.php/transactions/article/view/9315>

Index Terms—Biogas, carbon dioxide, carbon monoxide, sulfur dioxide, methane, air excess coefficient.

I. INTRODUCCIÓN

EN la búsqueda de fuentes de energía más sostenibles y respetuosas con el medio ambiente, el biogás ha emergido como una alternativa prometedora para la generación de energía en motores de combustión interna. Este combustible renovable, producido a partir de la descomposición anaeróbica de materia orgánica, no solo contribuye a la reducción de residuos, sino que también ofrece una reducción significativa en las emisiones de gases contaminantes en comparación con los combustibles fósiles tradicionales. El presente artículo se centra en el análisis y estudio de la combustión completa en motores de combustión interna que utilizan biogás como fuente energética. A través de un enfoque detallado, se explorarán los mecanismos de combustión, las condiciones óptimas para su funcionamiento y los beneficios ambientales asociados. Además, se discutirán los desafíos técnicos y económicos que enfrenta esta tecnología, así como su potencial para contribuir a un futuro energético más sostenible. Con este análisis, buscamos proporcionar una visión integral sobre el papel del biogás en la transición hacia sistemas energéticos más limpios y eficientes [1].

The associate editor coordinating the review of this manuscript and approving it for publication was Ricardo Arias Velásquez (*Corresponding author: Andrea Pérez*).

Andrea Pérez, E. Zamora, and G. Polupan are with Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, Mexico (e-mails: andy.930410@gmail.com, ezamora1981@gmail.com, and gpolupan@ipn.mx)

Consideramos determinar cómo se comporta el motor cuando trabaja con combustible gaseoso (biogás), con diferentes mezclas. Las principales ventajas de utilizar biogás son que es un combustible renovable, se produce a partir de materia orgánica, lo que contribuye a la reducción de residuos. Su uso en los motores de combustión interna puede disminuir las emisiones de gases contaminantes en comparación con los combustibles fósiles, ayudando a mitigar el cambio climático. No obstante, la investigación y el desarrollo continuos están abordando estos desafíos, con mejoras en la tecnología de purificación del biogás, el diseño de motores y la optimización de sistemas de combustión. Estas innovaciones están haciendo que los motores que funcionan con biogás sean una opción cada vez más viable y atractiva [2]. Esta investigación se centra en evaluar las características y el rendimiento de los motores que utilizan biogás como combustible, analizando los avances recientes en tecnología de motores, los beneficios ambientales y económicos, así como los desafíos asociados con su implementación. A través de una revisión completa de la literatura y estudios comparativos, este trabajo pretende proporcionar una visión integral de las oportunidades que ofrece el biogás como combustible para motores de combustión interna [3].

Este artículo se organiza de la siguiente manera. Introducción, donde se presenta el contexto del estudio y se justifica la importancia del trabajo. Metodología, en esta sección se describe cómo se llevó a cabo la investigación, incluyendo detalles sobre el diseño del estudio. Resultados, en esta sección mostramos los resultados esperados en las pruebas experimentales con ayuda de sensores. Conclusiones, resumen de los hallazgos más importantes y su relevancia.

II. TRABAJOS RELACIONADOS

Muchos profesionales, no solo nacionales, también internacionales se dedican a investigar cómo optimizar el uso del biogás en motores, mejorando la eficiencia y reduciendo las emisiones. Los diseñadores mecánicos han trabajado para la investigación y desarrollo de motores, trabajan en el diseño para que sean más compatibles con el biogás, adaptando componentes para maximizar su rendimiento [4]. Muchos proyectos de implementación, donde se han realizado algunas pruebas utilizando biogás como combustible en diferentes motores, se han desarrollado mediciones en las emisiones de los contaminantes. Hay otros estudios donde se implementan diferentes cantidades de biogás con otros combustibles [5], como gasolina, hidrógeno, diésel, etc. La obtención de

combustible fósil ocasiona severos daños al ambiente. Un biogás generado por las granjas es utilizado principalmente para plantas generadoras de luz, pero estudios recientes han demostrado que puede hacer trabajar un motor diésel por un poco más de 20 minutos, combinándolo con aditivos [6]. Este no es el único trabajo con aportaciones importantes al campo del biogás como combustible, también en España varios científicos han demostrado la efectividad de trabajar con biogás como combustible en motores que trabajan con hidrógeno, se han reducido considerablemente las emisiones y se ha comprobado que el uso de biogás no deteriora ni daña el motor ni sus componentes [7]. La adaptación de motores convencionales para utilizar biogás ha sido objeto de diversas investigaciones. Por ejemplo, estudios realizados por Kumar et al. (2022) han demostrado que la modificación del sistema de inyección y el ajuste en la relación aire-combustible pueden mejorar significativamente la eficiencia térmica y reducir las emisiones contaminantes. Estas modificaciones permiten una mejor atomización del combustible y una combustión más completa [8]. Investigaciones recientes han explorado estrategias innovadoras para mejorar la combustión completa en motores que utilizan biogás. El uso de aditivos, como el hidrógeno, ha mostrado resultados prometedores al aumentar el índice de octano y mejorar la estabilidad de la llama (Lee et al., 2023) [9]. Además, se ha investigado el uso de sistemas avanzados de control electrónico que optimizan las condiciones operativas en tiempo real [8].

III. METODOLOGÍA

Principalmente, vamos a identificar la necesidad de estudiar la combustión completa en motores de combustión interna que utilizan biogás, considerando su potencial como fuente de energía renovable [10]. Se seleccionó un motor de combustión interna adecuado para el estudio, en este caso, utilizamos un tractocamión que utiliza GNV (Gas Natural Vehicular). Seleccionamos los equipos necesarios para la medición de contaminantes ambientales, todo esto para realizar el análisis experimental [11]. Como se menciona, el estudio tuvo dos etapas: la primera, en el desarrollo de ecuaciones que nos permitieron de manera teórica conocer el comportamiento del motor de combustión interna cuando utiliza biogás como combustible; la segunda, realizamos un estudio experimental utilizando GNV en un motor de un tractocamión, midiendo los principales contaminantes ambientales, el cual es un motor de chispa (Otto-Biogás [6]). Basamos nuestros cálculos en un modelo de combustión de llamas premezcladas: apropiado para motores de chispa [7]. Evaluamos el rendimiento y las emisiones de un motor de combustión interna operando con biogás como combustible. Se realizaron los cálculos considerando diferentes cantidades de CH_4 y CO_2 [12].

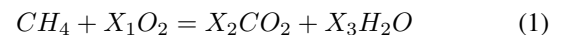
Para el análisis de las mezclas, utilizamos diferentes cantidades de metano y dióxido de carbono. Para la primera prueba utilizamos 70 % de CH_4 y 30 % de CO_2 ; para la segunda mezcla utilizamos 50 % de CH_4 y 50 % de CO_2 ; para la tercera mezcla utilizamos 60 % de CH_4 y 40 % de CO_2 .

IV. RESULTADOS

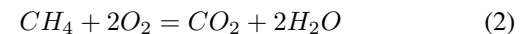
En esta sección, mostramos los resultados teóricos en combustión completa considerando diferentes cantidades de biogás [13]. El estudio de prueba se realizó únicamente analizando la combustión completa, considerando diferentes cantidades de metano y CO_2 . La Tabla I muestra los resultados obtenidos cuando se utiliza gas natural como combustible con diferentes coeficientes de exceso de aire. En la Tabla II, se muestran resultados de productos de combustión en diferentes coeficientes de exceso de aire, utilizando metano como combustible. La Tabla III muestra los resultados obtenidos con 50 % de gas metano y 50 % de CO_2 . En la Tabla IV podemos observar el comportamiento del motor cuando combinamos las mismas cantidades de metano y CO_2 . En la Tabla V podemos observar diferencias significativas a pesar de que solo estamos variando en mayor cantidad el metano. En la Tabla VII observamos diferentes combustibles que fueron usados en las pruebas teóricas, incluyendo diferentes propiedades como el porcentaje de carbono que se convierte en CO y el porcentaje de carbono que se convierte en CO_2 [14].

A. COMPARACIÓN DE COMPOSICIONES USANDO METANO Y BIOGÁS

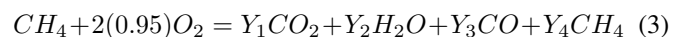
En esta sección, vamos a estimar las emisiones contaminantes de gas en metano y en biogás a partir de la ecuación estequiométrica,



donde X_1 , X_2 , y X_3 son variables estequiométricas. Para el carbono, vemos $X_2 = 1$. Para el hidrógeno, vemos que $4 = 2X_3$, entonces $X_3 = 2$. Finalmente, para el oxígeno, tenemos $2X_1 = 2X_2 + X_3$, entonces $X_1 = 2$. Sustituyendo estos valores estequiométricos [15], podemos encontrar la siguiente ecuación,



Reescribiendo la anterior ecuación para la combustión completa del metano, considerando el coeficiente de exceso de aire $\alpha = 0.95$, y también considerando variables de efecto térmico Y_1 , Y_2 , Y_3 y Y_4 , para la equivalencia de la misma ecuación, entonces



Analizamos la ecuación con respecto al número de átomos que contiene cada elemento, empezando con el carbono. Las variables de efecto térmico se determinan por el número de átomos de carbono que tiene la ecuación. En cada uno de los compuestos que contiene carbono, tenemos solo un átomo de carbono. Por tanto,

$$C : 1 = Y_1 + Y_3 + Y_4 \quad (4)$$

Hacemos lo mismo para el hidrógeno,

$$H : 4 = 2Y_2 + 4Y_4 \quad (5)$$

Finalmente, hacemos lo mismo para el oxígeno.

$$O : 2(2)(0.95) = 2Y_1 + Y_2 + Y_3 \quad (6)$$

TABLA I
RESULTADOS CON GAS NATURAL

Volumen	$\alpha = 1.01$	$\alpha = 1.03$	$\alpha = 1.05$	$\alpha = 1.10$	$\alpha = 1.15$
H ₂ O	0.0775	0.231	0.386	0.772	1.158
CO ₂	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87
SO ₂	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
N ₂	3.1352	3.213	3.292	3.488	3.684
O ₂	0.00823	0.0246	0.0246	0.0823	0.1234

TABLA II
RESULTADOS CON METANO

Volumen	$\alpha = 1.01$	$\alpha = 1.03$	$\alpha = 1.05$	$\alpha = 1.10$	$\alpha = 1.15$
H ₂ O	0.00233	0.00701	0.0116	0.02337	0.035
CO ₂	3.0884	3.0884	3.0884	3.0884	3.0884
SO ₂	0	0	0	0	0
N ₂	3.8076	3.69	3.99	4.236	4.474
O ₂	0.0099	0.0299	0.0499	0.0999	0.1499

TABLA III
RESULTADOS CON BIOGÁS 70 %CH₄-30 %CO₂

Volumen	$\alpha = 1.01$	$\alpha = 1.03$	$\alpha = 1.05$	$\alpha = 1.10$	$\alpha = 1.15$
H ₂ O	0.122	0.322	0.53	1.074	1.612
CO ₂	2.461	2.461	2.461	2.461	2.461
SO ₂	0	0	0	0	0
N ₂	2.663	2.730	2.797	2.964	3.131
O ₂	0.00701	0.021	0.035	0.070	0.1052

TABLA IV
RESULTADOS CON BIOGÁS 50 %-50 %

Volumen	$\alpha = 1.01$	$\alpha = 1.03$	$\alpha = 1.05$	$\alpha = 1.10$	$\alpha = 1.15$
H ₂ O	0.457	0.679	0.784	1.987	2.076
CO ₂	1.84	1.84	1.84	1.84	1.84
SO ₂	0	0	0	0	0
N ₂	1.678	1.897	1.997	2.023	2.178
O ₂	0.0101	0.034	0.067	0.088	0.247

TABLA V
RESULTADOS CON BIOGÁS 60 %-40 %

Volumen	$\alpha = 1.01$	$\alpha = 1.03$	$\alpha = 1.05$	$\alpha = 1.10$	$\alpha = 1.15$
H ₂ O	0.122	0.322	0.53	1.074	1.612
CO ₂	2.148	2.148	2.148	2.148	2.148
SO ₂	0	0	0	0	0
N ₂	2.03	2.123	2.367	2.537	2.738
O ₂	0.055	0.067	0.083	0.096	0.1678

Para tener un sistema de cuatro ecuaciones, consideramos la ecuación de combustión completa de metano CH_4 reportada [16], donde utilizamos las masas atómicas de sus elementos $C = 12(1) = 12$ kg/mol, $H = 1(4) = 4$ kg/mol, y su total 16 kg/mol, de tal forma que,

$$Y_3 = \frac{2(16)Y_4}{28} \quad (7)$$

El sistema de ecuaciones con cuatro incógnitas de efecto térmico, lo resolvemos utilizando el programa System Solver [17], obteniendo

$$\begin{aligned} Y_1 &= 0.91 \\ Y_2 &= 1.922 \\ Y_3 &= 0.045 \\ Y_4 &= 0.039 \end{aligned}$$

Vamos a calcular los volúmenes de los gases antes y después de la combustión para el biogás (GNV + metano). El volumen de los gases de combustión estequiométrica m^3 está compuesto por los volúmenes de dióxido de carbono, dióxido de azufre, vapor de agua y nitrógeno, a condiciones de referencia, al quemar $1 m^3$ de combustible gaseoso. En particular, el volumen total del gas antes de la combustión se representa con la ecuación,

$$V_{entrada} = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{N_2} + V_{H_2O} \quad (8)$$

Pero después de la combustión, el volumen total está dado por los mismos gases iniciales más el aire que entra, esto se toma en cuenta con el coeficiente de exceso de aire α , y por tanto, el volumen total después de la combustión se representa con la ecuación,

$$V_{salida} = (V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{N_2} + V_{H_2O})(\alpha - 1) \quad (9)$$

Los volúmenes $V_{CO_2} = 0.3888 m^3$, $V_{N_2} = 0.7774 m^3$, $V_{H_2O} = 0.0333 m^3$, $V_{SO_2} = 0.002 m^3$ se obtienen a partir de las masas moleculares de estos compuestos, considerando el volumen del aire, y usamos la ecuación(8) para calcular el volumen de entrada, el cual es $V_{entrada} = 1.2015 m^3$. Por otra parte, los volúmenes de estos gases después de la combustión son $V_{CO_2} = 0.3009 m^3$, $V_{N_2} = 0.3411 m^3$, $V_{H_2O} = 0.1033 m^3$, y $V_{SO_2} = 0.001 m^3$. Estos últimos se obtuvieron a partir de las masas moleculares para quemar $1 m^3$ de GNV. Al usar la ecuación (9) considerando $\alpha = 1.01$, se obtiene $V_{salida} = 0.007463 m^3$. Con estos datos, mostramos que el volumen total de los gases de salida (de escape) es menor que el volumen de los gases de entrada, cuando se utiliza biogás como combustible [15].

V. EXPERIMENTACIÓN EN ARDUINO UNO

Para realizar estas pruebas experimentales, se cuenta con un Arduino UNO, los sensores para gas: MQ-7 para medir monóxido de carbono, este sensor es ideal para detectar concentraciones dañinas, MQ-4 para medir metano y MQ-135 para medir dióxido de carbono. Se genera el código en Arduino y, para visualizar los datos obtenidos, utilizamos Matlab. Estos sensores y su rango de PPM (partículas por millón) los podemos observar en la Tabla VI. Contamos con

289871	1	167	2021-01-05 17:52:04
289872	2	29.39	2021-01-05 17:52:08
289873	3	253	2021-01-05 17:52:11
289874	4	258	2021-01-05 17:52:12
289875	1	168	2021-01-05 17:52:17
289876	2	29.15	2021-01-05 17:52:17
289877	3	253	2021-01-05 17:52:17
289878	4	259	2021-01-05 17:52:17
289879	1	168	2021-01-05 17:52:23
289880	2	29.64	2021-01-05 17:52:23
289881	3	254	2021-01-05 17:52:23
289882	4	259	2021-01-05 17:52:23
289883	1	168	2021-01-05 17:52:28
289884	2	28.91	2021-01-05 17:52:28
289885	3	253	2021-01-05 17:52:28
289886	4	259	2021-01-05 17:52:29
289887	1	168	2021-01-05 17:52:34
289888	2	29.15	2021-01-05 17:52:34
289889	3	254	2021-01-05 17:52:34
289890	4	259	2021-01-05 17:52:34

Fig. 1. Muestra los datos obtenidos a través del Arduino de los tres sensores conectados desde el inicio de la prueba hasta el final. La primera columna es la medida del acelerómetro de cada sensor, la segunda columna es el pin del Arduino, la tercera columna son las emisiones en partes por millón, y finalmente, la fecha y la hora de la medición.

un motor monocilíndrico de cuatro tiempos, de 6 caballos de fuerza; este motor lo utilizamos para realizar las diferentes pruebas, con diferentes combustibles gaseosos, obteniendo así datos experimentales [18]. En la Tabla VI podemos observar las PPM de cada sensor especificando su nomenclatura. La plataforma Arduino nos permite medir los diferentes contaminantes de manera más eficiente, arroja los datos y podemos graficarlos para su posterior análisis. En la Tabla II podemos observar los diferentes valores cuando utilizamos gas metano puro, usando diferentes valores de coeficiente de aire.

VI. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En esta ocasión, para realizar las diferentes pruebas, se realizó en una habitación cerrada, con la finalidad de encerrar el humo que emite el motor; de esta manera, los sensores de gas podrán enviar datos más certeros. Los datos obtenidos en Arduino se presentan a continuación [14]. La Fig. 1 muestra los datos obtenidos en Arduino, desde el inicio de la prueba hasta el final.

Una de las pruebas que se realizaron fue la medición de consumo de combustible, cuando teníamos encendido el motor por un tiempo constante de 20 minutos fue el tiempo para cada una de las pruebas [14], son suficientes para que el motor esté trabajando como si estuviera sobre carretera, según los estudios de esta manera determinamos cuánto tiempo el motor está encendido utilizando diferentes combustibles [6], para nuestra prueba experimental, tuvimos complicaciones en conseguir metano, es caro y difícil de transportar, pero dándole solución, conseguimos gas propano; con este cilindro de gas, logramos hacer las diferentes pruebas [19]. En la Fig. 2 podemos observar el consumo del motor con diferentes cantidades de combustible. Es importante mencionar que el gas propano es un gas diferente en composición al metano, por lo que nuestros resultados experimentales serán muy cercanos a los esperados al utilizar metano puro [20].

Medimos los gases de escape CO y CO_2 en la combustión incompleta, cuando variamos las velocidades del motor. Las

LOS VALORES PRESENTADOS SON REFERENTES A LAS ESPECIFICACIONES DE CADA SENSOR, VISUALIZADOS EN CADA HOJA DE DATOS

Sensor	Mayor Sensibilidad a Gas	Rango PPM
MQ-4	Metano	200PPM-5000PPM
MQ-7	Monóxido de Carbono	20PPM-2000PPM
MQ-135	Dióxido de Carbono	350PPM-10000PPM

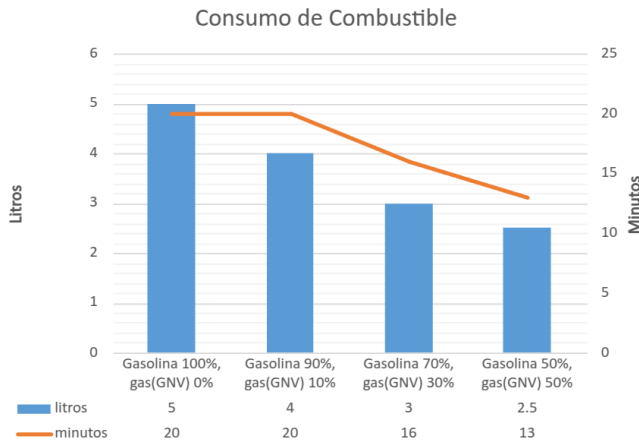


Fig. 2. Muestra el consumo en el motor con diferentes cantidades de combustible.

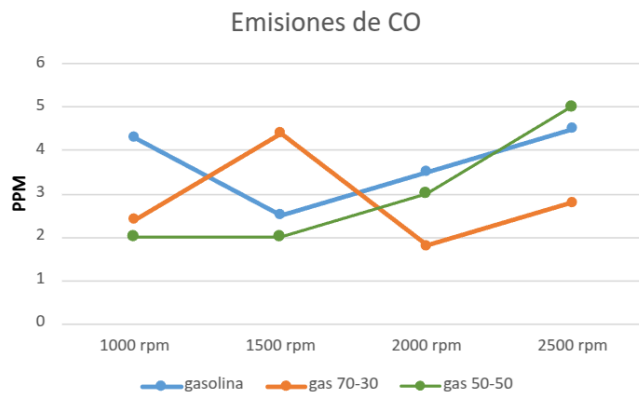


Fig. 3. En la grafica podemos examinar que tiene similitudes, con pequeñas reducciones de gases de escape, indicando que el proceso de combustión es un poco más eficiente con las mezclas gaseosas. Las unidades de las emisiones están en partes por millón (ppm).

rpm se miden con ayuda de un multímetro automotriz, el cual va conectado directamente en el cable de bujía [21]. Cuando el porcentaje de CO_2 aumenta en la mezcla de gas, mayor cantidad de carbono se convierte en CO_2 , teniendo en cuenta que la potencia de salida va a disminuir [20]. Se muestran los resultados en emisiones de CO medidos por el sensor MQ-7, los datos que nos arroja la plataforma de Arduino se graficaron y se muestran en la Fig. 3. Las emisiones obtenidas [22] por el sensor MQ-135 se muestran en la Fig. 4.

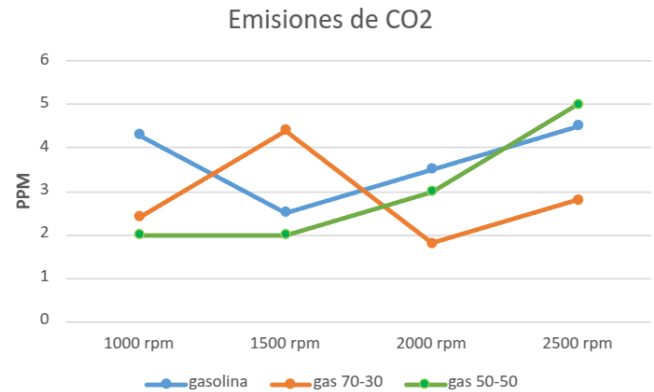


Fig. 4. Muestra las emisiones de CO_2 en partes por millón (ppm) medidas por el sensor MQ-135.

VII. DISCUSIÓN

En este apartado vamos a comparar las emisiones contaminantes de un motor que utiliza gasolina con las emisiones que obtuvimos en nuestros resultados utilizando combustible gaseoso (según las normas vigentes ambientales en México [24]). Las emisiones que vamos a comparar son: NO_x , CO, CO_2 , y HC [9]. La Tabla VIII muestra los principales contaminantes medidos con el sensor. Podemos observar que la disminución en el principal contaminante CO_2 es un valor relativamente alto [8]. Medimos las emisiones para el caso del biogás usando dos conjuntos de sensores: 1) los sensores MQ-135, MQ-4, y MQ-7 conectados al Arduino, y 2) el sensor digital para contaminantes que se muestra en la Fig. 6. Cabe aclarar que reportamos el promedio de los valores medidos por estos dos conjuntos de sensores. En la Fig. 5, podemos observar el banco de pruebas, el cual pertenece a un motor de un tractocamión que utiliza GNV como combustible y que nos facilitó la realización de las pruebas. En la Fig. 6, se muestra un sensor digital que mide los principales contaminantes ambientales, el cual nos fue de gran ayuda para representar mediciones válidas.

VIII. CONCLUSIONES

El biogás está compuesto por una mezcla rica en metano, que permite una combustión eficiente y menos contaminante en comparación con combustibles fósiles tradicionales. A lo largo del artículo, se ha evidenciado que el uso de biogás como combustible en motores de combustión interna no solo reduce las emisiones de gases de efecto invernadero, sino que también contribuye a la gestión de residuos orgánicos, promoviendo un ciclo de energía más circular [6]. El estudio experimental nos

TABLA VII
RELACIÓN ENTRE LA PRODUCCIÓN DE EMISIONES A PARTIR DEL CARBONO EN EL COMBUSTIBLE [23]

Combustible	Masa Promedio de Carbono en Combustible (Kg)	Porcentaje de Carbono en el Combustible que se convierte en CO	Porcentaje de Carbono en el Combustible que se convierte en CO ₂
Gasolina	0.44	0.19	0.81
90 %C ₄ H ₁₀ 10 % CO ₂	0.39	0.09	0.91
70 %C ₄ H ₁₀ 30 % CO ₂	0.55	0.01	0.98
50 %C ₄ H ₁₀ 50 % CO ₂	1.04	0.005	0.99



Fig. 5. Banco de pruebas correspondiente a un motor de un tractocamion que utiliza gas GNV como combustible



Fig. 6. Sensor digital de medición de contaminantes, utilizado en el escape del tractocamion para medir (CO₂, HC, CO)

TABLA VIII
CONTAMINANTES PROVENIENTES DEL MOTOR CUANDO SE UTILIZA BIOGÁS Y GASOLINA

Contaminante	Gasolina	Biogás
CO	0.02 % en vol.	0.09 % en vol.
CO ₂	14.09 % en vol.	9.01 % en vol.
HC	0.4 ppm	0.01 ppm

arroja resultados sumamente prometedores donde la reducción en los principales contaminantes ambientales es evidente en las tablas mostradas [25]. Los estudios analizados evidencian que, al implementar tecnologías adecuadas, es posible optimizar el rendimiento de los motores que operan con biogás, logrando niveles de eficiencia similares a los de los combustibles convencionales [2].

Se planea realizar diferentes actividades al concluir esta investigación. Optimización de mezclas de combustible, investigar diferentes mezclas de biogás y otros combustibles (como gas natural o biodiésel) para determinar la mezcla óptima que maximice la eficiencia del motor y minimice las emisiones. Desarrollo de motores adaptados, diseñar y probar motores de combustión interna para funcionar con biogás. Realizar un análisis exhaustivo de las emisiones generadas por motores que utilizan biogás [26].

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo brindado por el Instituto Politécnico Nacional (IPN) a través de los proyectos 20230232 y 20240108 para la realización de esta investigación. El primer autor agradece al CONACYT la beca otorgada para realizar sus estudios de doctorado.

REFERENCIAS

- [1] L. Corredor y F. Bermejo, «Conversión de los motores Diesel a Gas Natural utilizados en el transporte público de la ciudad de Barranquilla», *Revista Gas Natural Vehicular*, n.º 31, págs. 48-52, abr. de 2008. DOI: <https://doi.org/10.26507/rei.v5n10.107..>
- [2] R. Crookes, «Comparative bio-fuel performance in internal combustion engines», *Biomass and Bioenergy*, vol. 30, págs. 461-468, 2006. DOI: :10.1515/mecdc-2015-0003.
- [3] Instituto de Investigaciones Tecnológicas (IIT), *Estudio sobre obtención de Biogás a partir de desechos orgánicos*, Bogotá, 2003.
- [4] I. Khan, T. Yasmin y A. Shakoore, «Technical overview of compressed natural gas (CNG) as a transportation fuel», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 73, págs. 145-157, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.06.053>.

- [5] K. C. Surendra, D. Takara, A. G. Hashimoto y S. K. Khanal, «Biogas as a sustainable energy source for developing countries: Opportunities and challenges», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 31, págs. 846-859, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.12.015>.
- [6] S. J. Valles Marco, «A Formal Model for the Requirements Diagrams of SysML», *Latin America Transactions, IEEE (Revista IEEE America Latina)*, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ref.2024.100545>.
- [7] R. Z. X. Chen y Romano., «Anaerobic digestion of food wastes for biogas production», *Int J Agric and Biol Eng*, vol. 3, n.º 4, 2020. DOI: 10.1109/TLA.2010.5538400.
- [8] N. A. Vinces, J. M. Gaibor Flores, M. I. Ruiz y T. Albarracín, «Diseño de un Enfriador de Bajo Costo para un Motor de Combustión Interna de un Suzuki Forza 1 Mediante un Dispositivo Alternativo», *Ciencia Latina Revista Científica*, 2024. DOI: 10.37811/cl_rcm.v8i4.13230.
- [9] D. P. Janer, «Estudio del funcionamiento de motores alternativos de combustión interna mediante la utilización de combustibles alternativos», *Science*, 2022. DOI: 10.18845/tm.v31i2.3620.
- [10] J. G. A. Milushka Llanos Cruz Lawrence Quipuzco Ushñaua, «Evaluación del desempeño de un motor de combustión interna a gasolina convertido a biogás», *reserchGate*, 2022. DOI: 10.25127/aps.20173.369.
- [11] E. Obert, *Motores de Combustión Interna .Biogas e Hidrogeno*. México: Compañía editorial Continental, 2006. DOI: <https://doi.org/10.18273/revuin.v21n3-2022004>.
- [12] D. Gielen, F. Boshell, D. Saygin, M. D. Bazilian, N. Wagner y R. Gorini, «The role of renewable energy in the global energy transformation», *Energy Strategy Reviews*, vol. 24, págs. 38-50, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ref.2024.100545>.
- [13] H. MacLean y L. Lave, «Evaluating automobile fuel/propulsion system technologies», *Progress in energy and combustion science*, vol. 29, págs. 1-69, 2003. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0360-1285\(02\)00032-1](https://doi.org/10.1016/S0360-1285(02)00032-1).
- [14] F.E.Sierra, «Tecnologías para el Aprovechamiento de los Biocombustibles», *Unoversidad Nacional de Colombia*, 2008. DOI: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-27242011000100009>.
- [15] K. Nagar, «Handbook on biogas and Applications», *National Institute of Industrial Research*, 2007. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16155742>.
- [16] K. M.K, «Dual Fuel Biogas Engines», *Commonwealth Regional (Asia/Pacific) Rural Assian*, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/bs.aibe.2017.01.001>.
- [17] E. Porpatham, «Effect of compression ratio on the performance and combustion of a biogas fuelled spark ignition engine», *Science Direct, Indian Institute of Technology*, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.10.059>.
- [18] F. Bauer, C. Hulteberg, T. Persson y D. Tamm, «Biogas upgrading - Review of commercial technologies», *Environmental Technology*, vol. 34, n.º 13-14, págs. 1693-1706, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.06.053>Getrights.
- [19] E. Obert, *Motores de Combustión Interna: Análisis y aplicaciones*. México: Compañía editorial Continental, 2000, ISBN: 968-26-1035-4. DOI: <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.18359/rcin.1626>.
- [20] D. P. Chynoweth y R. Isaacson, *Anaerobic Digestion of Biomass*. Elsevier Applied Science, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.peccs.2013.03.003>.
- [21] A. Yousuf, M. R. Khan y M. Tushar, «Performance and emission characteristics of a biogas-fueled spark ignition engine at various compression ratios», *Energy Reports*, vol. 6, págs. 498-504, 2020. DOI: 10.15866/ireme.v18i1.22602.
- [22] G. Sierra y H. Sanchez, *Usos del Biogas como combustible*. Editorial Porrúa, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642013000600002>.
- [23] J. Córdoba y R. Cardona, *Caracterización y Diseño de Mezcladores para Motores de Combustión Interna Convertidos a Gas Natural*, Proyecto de grado para optar el título de Ingeniero Mecánico, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2005.11.022>.
- [24] J. R. E. Chile, «POTENCIAMIENTO DE MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA», *Science*, 2023. DOI: 10.70208/3007.8245.v1.n1.5.
- [25] J. N. Alirio Jimenez, «Efectos del Gas Combustible en el Rendimiento de los Motores de Combustión Interna», *reserchGate*, 2023. DOI: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642017000100002>.
- [26] X. Liu y X. Wang, «Experimental study on the performance and emissions of a biogas-diesel dual fuel engine», *Fuel*, vol. 184, págs. 35-42, 2016.

Andrea E. Pérez-Ramos is a seventh-semester doctoral student in mechanical engineering sciences at the National Polytechnic Institute (IPN), participated in the mechanical engineering congress, with the presentation on Alternative Fuels, by the National University of Mexico (UNAM).



Georgiy P. Polupan is a full professor in Instituto Politecnico Nacional (IPN). Researcher emeritus of the CONAHCYT system, level II, has been the author of several articles on thermodynamics, combustion, and thermofluids and has directed over 60 theses on these topics. He has received recognition for his outstanding participation in different national and international conferences.





Erik Zamora is a full professor at the Instituto Politécnico Nacional (IPN). He earned a Diploma in electronics from UV (2004), followed by an M.Sc. in electrical engineering (2007) and a D.Sc. in automatic control (2015), both from CINVESTAV-IPN. He created the first commercial Mexican myoelectric prosthesis system and a robotic navigation system at the University of Bristol. He has authored more than 40 conference and journal papers and has supervised over 37 theses in these areas.