

ALTERNATIVAS PARA EL MEJORAMIENTO DE BIOCOMBUSTIBLES GASEOSOS EN MOTORES^a

ALTERNATIVES FOR IMPROVING GASEOUS BIOFUELS IN ENGINES

HÉCTOR H. RIOJAS-GONZÁLEZ^b *, LIBORIO BORTONI-ANZURES^c, JUAN MARTÍNEZ-TORRES^d, HÉCTOR A. RUIZ^e

Recibido para revisar 30-05-2023, aceptado 7-12-2023, versión final 13-12-2023.

Artículo Revisión

RESUMEN: La generación del gas a partir de la biomasa se considera como la gran opción en sustitución el gas convencional (gas natural y gas licuado de petróleo). Ya sea el biogas o el syngas (gas de síntesis) a partir de residuos, en donde no tienen efectos dañinos en el uso de la tierra, puesto que los procesos de siembra son innecesarios, el biogas puede ser utilizado sin un tratamiento de purificación, sobre todo para usarlo en zonas rurales, en donde no se justifica una gran inversión en los tratamientos. El motivo de elegir este tema de investigación, es el de ayudar a contribuir a las energías renovables en su aplicación, la metodología aplicada para esta investigación es de revisión bibliográfica exhaustiva, los resultados muestran que para mejorar las propiedades de combustión del biogás y del syngas, se deben usar una serie de estrategias, entre las cuales se encuentra el agregar O₂, H₂, GN, CH₄ y EGR, también se encuentra la opción del empleo de supercargador, quemadura magra y la mejora de la calidad del biogás a través de su purificación, en este último caso tiene algunas aplicaciones como lo es bio-CNG en vehículos de transporte.

PALABRAS CLAVE: Biogás; syngas; gas natural; purificación; motor de combustión.

ABSTRACT: The generation of gas from biomass is considered as the great option to replace conventional gas (natural gas and liquefied petroleum gas). Either biogas or syngas from waste, where they have no harmful effects on land use, since planting processes are unnecessary, biogas can be used without a purification treatment, especially for use in rural areas, where a large investment in treatments is not justified. The reason for choosing this research topic is to help contribute to renewable energy in its application, the methodology applied for this research is exhaustive bibliographic review, the results show that to improve the combustion properties of biogas and syngas, a series of strategies must be used, among which is the addition of O₂, H₂, GN, CH₄ and EGR, is also the option of the use of superchargers, lean burn and the improvement of the quality of biogas through its purification, in the latter case has some applications such as bio-CNG in transport vehicles.

KEYWORDS: Biogas; syngas; natural gas; purification; combustion engine.

^aRiojas-González, H. H., Bortoni- Anzures, L. J., Martínez-Torres, J. & Ruiz, H. A. (2024). Alternativas para el mejoramiento de biocombustibles gaseosos en motores *Rev. Fac. Cienc.*, 13 (1), 6–35. DOI: <https://10.15446/rev.fac.cienc.v13n1.109222>

^b Profesor investigador, Universidad Politécnica de Victoria, Ciudad Victoria, Tamaulipas, México

* Autor para correspondencia: hriojasg@upv.edu.mx

^cProfesor investigador, Universidad Politécnica de Victoria, Ciudad Victoria, Tamaulipas, México

^d Profesor catedrático, Universidad Politécnica de Victoria, Ciudad Victoria, Tamaulipas, México

^eInvestigador líder del Grupo de Biorrefinería, Departamento de Investigación en Alimentos, Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Coahuila, Saltillo, Coahuila, México

1. INTRODUCCIÓN

La generación de gas a partir de la biomasa se considera una opción prometedora para substituir o combinar con los gases convencionales (gas natural y gas licuado de petróleo). De hecho, se producirán nuevas categorías de gases, como el syngas (gas de síntesis), biogás y biometano a partir de varias vías de transformación de biomasa, como la digestión anaerobia, gasificación, pirolisis y metanización (Hilaire *et al.*, 2017). En comparación con los biocombustibles líquidos (biodiésel y etanol) el biogás producido a partir de residuos, no tiene efectos dañinos en el uso de la tierra, porque los procesos de siembra son innecesarios (Uusitalo *et al.*, 2013). De hecho, los aceites no comestibles que se extraen de las semillas de fruta, como la *Jatropha curcas*, pongamia pinnata (*Millettia pinnata*), moha (*Setaria italica*), saemaruba (*Bursera simaruba*), contienen aproximadamente el 25 % de aceite mientras que el restante 75 % se compone de residuo de semillas, este residuo de semillas podría utilizarse para la producción de biogás (Chandra *et al.*, 2012). Un kg de semilla de pongamia pinnata es un producto que después de la extracción de aceite puede producir alrededor de 0.738 m³ de rendimiento de biogás, con un contenido de metano de 62.5 % (Asam *et al.*, 2015). El biogás es un combustible muy adecuado para la combustión dual, esto es debido al hecho de que el biogás tiene altas propiedades de anti-golpe, con una creciente relación de compresión (Montoya *et al.*, 2015), se puede utilizar con biodiésel como combustible piloto (Golimowski *et al.*, 2019). Las formas que nos ayudan para mejorar la eficiencia térmica en el motor son cuando se agrega el biogás con O₂, otra manera sería en un supercargador o en un sistema de mezcla en la línea de entrada, o también en un precalentamiento con la mezcla de entrada (Yilmaz *et al.*, 2017). La mezcla de biogás con combustibles de mayor velocidad de combustión laminar como H₂, NG, C₃H₈ y GLP son una forma confiable y económica para aumentar la mejora del biogás y así aplicarlo en los motores (Pizzuti *et al.*, 2016). Otra estrategia para mejorar el biogás es aplicando la quemadura magra la cual es eficaz para reducir el consumo de combustible y reducir el NOx o la aplicación de EGR con el biogás para la regulación del NOx (Yamasaki *et al.*, 2013).

2. BIOGÁS CRUDO COMO COMBUSTIBLE

La eliminación del CO₂ en el biogás es un proceso costoso y requiere una cantidad sustancial de energía (Verma *et al.*, 2017). En plantas grandes, el CO₂ del biogás se puede reducir a través de métodos de lavado (Yousef *et al.*, 2016), sin embargo, en pequeñas plantas de biogás utilizadas en áreas rurales, esto puede no ser viable, por lo tanto, en zonas rurales, es posible que haya que encontrar métodos para utilizar el biogás sin eliminar el CO₂ (Rahman *et al.*, 2017). Es claro que el aumentar la concentración de CO₂ se reduce el valor del combustible, lo que aumenta el consumo de combustible, sin embargo, el impacto de la concentración de CO₂ en el funcionamiento del motor sigue sin estar claro, en la Tabla 1 se muestran las desventajas en usar CO₂ en motores.

Si este impacto es bajo, puede ser razonable y económicamente eficiente eliminar solo parcialmente el CO₂

Tabla 1: Desventajas que afectan al motor en usar el CO₂

Como afecta el motor	Argumento	Referencia
Deterioro en la estabilidad	Conduce al deterioro en el funcionamiento y aumento de CO	Chen <i>et al.</i> (2016)
Baja eficiencia térmica	Genera una baja eficiencia e incrementa el HC	Duarte <i>et al.</i> (2014); Rahman <i>et al.</i> (2017)
Disminuye la velocidad	Reduce la velocidad de la propagación de la llama	Byun <i>et al.</i> (2015)
Absorbe energía	Absorbe la llama de combustión reduciendo su velocidad	Bari (1996)
Incrementa el consumo	Genera un aumento en el consumo de combustible	Kim <i>et al.</i> (2016)
Reduce el valor calorífico	Se disminuye el valor calorífico y reduce la propagación de la flama	Shigarkanthi <i>et al.</i> (2005)

y no eliminar el CO₂ del biogás para su uso en motores diésel. En la Tabla 2 se presentan las ventajas de usar el CO₂ en un motor.

De acuerdo con Kovacs & Torok (2010), han observado que cuando es menor el contenido de metano en el biogás, mayor es el CO₂, el cual se refleja en los gases de escape. De acuerdo con Lee (2010), mostró que la presencia de CO₂ en el combustible disminuye el rendimiento del motor y produce más contaminantes en comparación con el CH₄ puro, la eficiencia del motor se reduce al mezclarlo con el CO₂ bajo las mismas condiciones de carga, a medida que aumenta la fracción de CO₂ en el combustible, necesitará más combustible, para generar la misma potencia de salida. En altas temperaturas de combustión, el CO₂ absorbe una gran cantidad de calor y, por lo tanto, reduce significativamente la temperatura de la llama. Sin embargo, el precalentamiento de la mezcla aumenta la temperatura de la llama, lo que el CO₂ se disocia y emitirá más CO a través del escape de compresión, el cual puede aumentar hasta 16:1. El aumento de la relación de compresión, puede mejorar la eficiencia del motor, y también puede causar una mejor conversión de energía en la cámara de combustión, lo que da como resultado menores esfuerzos térmicos (Razbani *et al.*, 2011). La degradación del motor debido al biogás no tratado, puede ser contrarrestado con un tratamiento de superficie, como los recubrimientos cerámicos, los cuales son más resistentes químicamente (Jena *et al.*, 2019), desafortunadamente esto implica altos costos. Una solución de bajo costo ideal para pequeñas fincas, es tomar precauciones básicas del motor sin tratar el biogás, pero aplicando el uso de lubricantes de alto TBN (número total de base), para que el aceite contrarreste el ambiente ácido (Maizonnasse *et al.*, 2013). Fabricantes de motores como Waukesha, Caterpillar, Deutz, GE Jenbacher, recomiendan que la concentración máxima de H₂S en el biogás no tratado, no debe ser más de 100 ppmv a 1000 ppmv, dependiendo del tamaño y la robustez del motor. Los fabricantes también recomiendan encarecidamente evitar cualquier condensación de agua que va en el motor (Maizonnasse *et al.*, 2013). La inserción de anillos

Tabla 2: Ventajas de la presencia del CO₂ con el biogás

Mejora en el motor	Argumento	Referencia
Reduce el NO _x	Es adecuado para reducir los NO _x	Kim <i>et al.</i> (2016) Korakianitis <i>et al.</i> (2011) Kan <i>et al.</i> (2018)
Reduce el humo	Reduce la velocidad del proceso de oxidación de hidrocarburos	Verma <i>et al.</i> (2017)
El CO ₂ no es nocivo	El CO ₂ del biogás se considera carbono neutral por lo que no afecta al ambiente	Nizar & Noburu (2008) Barik <i>et al.</i> (2017)
Previene golpes	Por ser gas inerte limita la posibilidad de una detonación en el motor	Duarte <i>et al.</i> (2014) Kan <i>et al.</i> (2018)
Permite mayores RC	Por su resistencia a los fenómenos como el golpe, puede emplear mayores relaciones de compresión	Tricase & Lombardi (2009)
El rendimiento energético mejora	En modo de mezcla mejora el rendimiento energético de MBT (par de frenado máximo) mejor	Kan <i>et al.</i> (2018)

de corte en la parte superior de las paredes del cilindro, evita la formación de depósitos, también se puede emplear el uso de materiales de resistencia a la corrosión para rodamientos, una estructura de superficie más densa, ayudará a protegerse de un entorno corrosivo, esto también mejora la aceptación de la carga del rodamiento del motor, por lo que se podría alcanzar una mayor carga del motor (Razbani *et al.*, 2011). Las resinas fenólicas podrían prevenir la corrosión de los intercambiadores de calor de cobre, y proporcionar una buena conducción de calor al mismo tiempo. Si esto fuera insuficiente en un ambiente muy corrosivo, el cobre podría remplazarse con acero inoxidable y también se preferirán los pistones de acero forjado en lugar del aluminio, por lo que el revestimiento debe diseñarse desde cero (Razbani *et al.*, 2011). La presencia de CO₂ puede generar menor oxígeno disponible en la combustión, esto se traduce en una pérdida de eficiencia, puesto que la mezcla tiende a ser demasiado rica con altas cargas y grandes flujos de biogás. Por lo que con la eliminación del CO₂, mejora el rendimiento energético, pero no mejora la reducción de emisiones como el NO_x. Por lo que puede ser razonable y económicamente eficiente solo eliminar parcialmente el CO₂, además que puede disminuir la tendencia de inicio de golpe (Kan *et al.*, 2018). También se podría aplicar la técnica de combustión sin llama (Figura 1), la cual puede ser un gran método de combustión para biogás, en donde podría mantenerse incluso en altas concentraciones de CO₂, la temperatura uniforme dentro de la cámara sin llama, puede asegurar la durabilidad de un material refractario (cerámica). El costo inicial del método es alto, pero con esto se podría usar el biogás sin problemas. La adición de hidrógeno al biogás

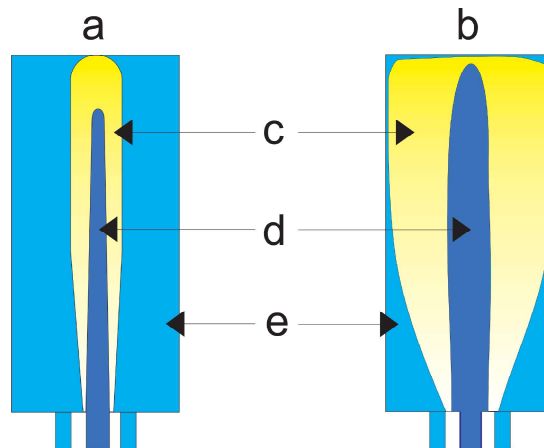


Figura 1: Combustión sin llama, a) Combustión convencional, b) Combustión sin llama, c) Zona de reacción, d) Zona no reactiva, e) Zona de reacción posterior. Fuente: Elaboración propia.

en un régimen de combustión sin llama, aumentaría la estabilidad de la combustión, pero la formación de contaminantes se intensificaría (Hosseini *et al.*, 2014). De acuerdo con Hinzmann *et al.* (2014), estudio la velocidad de llama laminar de $\text{CH}_4 - \text{CO}_2$ en un amplio rango de temperaturas y presiones, encontraron que la velocidad de combustión disminuye la presión y aumenta la temperatura, cuando la fracción de CO_2 es del 40%, la velocidad de la combustión se reduce al 65% comparándolo con el metano puro. Si el biogás llegara a contener más del 45% de dióxido de carbono, causaría daños en el funcionamiento del motor. Por lo tanto, la aplicación directa del biogás crudo (con una concentración menor del 45% de CO_2) es más económica para motores o suministros de calor, por lo que se propone que la combustión del biogás se podría enriquecer con hidrógeno u oxígeno, como métodos potenciales para mejorar la combustión del biogás (Li *et al.*, 2017).

3. ALTERNATIVAS EN EL MEJORAMIENTO DEL BIOCOMBUSTIBLE GASEOSO

Se ha realizado numerosos esfuerzos para mejorar el valor calorífico del biogás y el syngas, a través de la adición de diversos tipos de combustibles con alto valor calorífico, como el gas natural, diésel, gasolina e hidrógeno. También se han considerado para mejorar las condiciones de combustión, una mayor relación de compresión, mezclas con etanol y el incremento de la presión del aire de admisión (Yaliwal *et al.*, 2016). Todo esto con el fin de evitar la reducción de potencia, y lograr una mayor eficiencia térmica (Chandra *et al.*, 2011). Considerando una calidad óptima de mezcla, y con límites de extremidades ricos y magros, será la mejor respuesta general del motor (Nadaleti *et al.*, 2018). Para disminuir las emisiones derivadas de la combustión incompleta, se pueden aplicar la inyección de combustibles oxigenados y el uso de EGR caliente. Otras opciones para lograr una mejor duración de la combustión, es reduciendo la presión de inyección o dividiendo el proceso de inyección, la oportunidad de esta configuración del motor dependerá de los valores energéticos y ambientales (Hernández *et al.*, 2015).

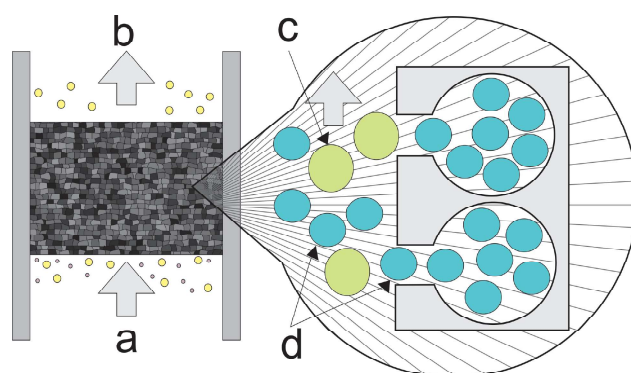


Figura 2: Método de adsorción de inversión de presión; a) entrada de aire, b) salida de gas, c) nitrógeno y d) oxígeno disuelto.

Fuente: Elaboración propia.

4. BIOCOMBUSTIBLE GASEOSO ENRIQUECIDO CON OXÍGENO

Los combustibles gaseosos exhiben amplios límites de ignición, y pueden formar fácilmente mezclas homogéneas con aire, para favorecer la combustión completa (Ravi *et al.*, 2016). También tienen la posibilidad de aplicar una mayor relación de compresión, cuando se alimenta con gas productor, sin que este tenga una tendencia de detonación, las altas concentraciones de nitrógeno (entre 40% y 50%) de una mezcla de combustible-aire, evitan detonaciones, lo cual es benéfico en casos que se empleen altas relaciones de compresión en el motor (Martínez *et al.*, 2012). El syngas (gas de síntesis) tiene un valor calorífico más bajo en comparación con el biogás, evitando con esto el golpe en los motores alimentados de syngas con exceso de aire (Marculescu *et al.*, 2016).

El aumentar la disponibilidad de oxígeno en el cilindro, mejora la combustión y la eficiencia, y además puede reducir las emisiones del biogás, esto se puede lograr aumentando la concentración de oxígeno en el aire de admisión. El aire se puede separar de sus componentes utilizando una variedad de técnicas tales como: las separaciones criogénicas, adsorción por inversión de presión (Figura 2), la tecnología de membrana y métodos de subproductos de generación de oxígeno, en cuanto a la tecnología de separación de aire, este puede producir oxígeno a diferentes purezas, presiones y caudales volumétricas (Porpatham *et al.*, 2017). El enriquecimiento de oxígeno es una técnica viable para del motor diésel dual con biogás en cargas ligeras, debido a las mejoras en el rendimiento y en su eficiencia térmica. Cuando se disminuye el retraso de encendido, este genera altas tasas de combustión con una disminución de las emisiones (Cacua *et al.*, 2012). De acuerdo con Dasappa & Sridhar (2013), señalaron que la mezcla de gas productor caliente con flujo de aire, reduce la cantidad de oxígeno requerido para la combustión, esto da como resultado, un mayor CO, junto con un incremento de temperatura en el escape, el cual conduce a mayores pérdidas, esto se puede solucionar con una mezcla más homogénea de gas productor/aire, dando como resultado una mejor combustión.

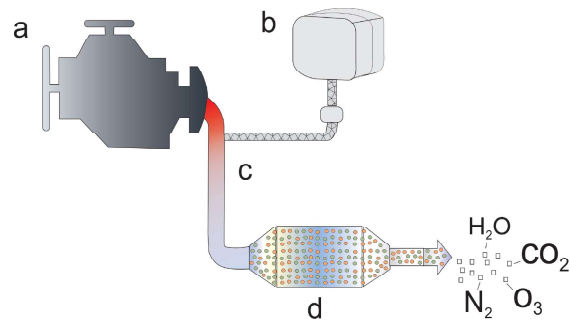


Figura 3: Funcionamiento de catalizador SCR: a) Motor, b) Unidad de dosificación, c) Gases de escape, d)Catalizador SCR.

Fuente: Elaboración propia.

El uso de aire enriquecido con oxígeno en un motor dual con biogás-diésel, minimiza el efecto del CO₂ (Rajkumari *et al.*, 2010), esto también lo reafirman Cacua *et al.* (2012), en donde investigaron el efecto del oxígeno enriqueciendo con aire, sobre el rendimiento de biogás en combustión dual. Los resultados indican, que el efecto negativo del CO₂ puede ser atenuado con una pequeña adición de oxígeno. También realizaron mezclas de biogás y le aumentaron la concentración de O₂ en el aire de admisión con un 27% en volumen. Los resultados muestran una reducción en el retraso de ignición, en todos los niveles de enriquecimiento de O₂, esto último fue debido, a la mayor cantidad de O₂ disponible en el proceso de ignición. Con el 40% de O₂, genero un incremento de la eficiencia térmica del 28%, la cual se le atribuye a la tasa de reacción de oxidación en el combustible, y las altas velocidades de propagación de la llama.

5. APLICACIÓN DE EGR (RECIRCULACIÓN DE LOS GASES DE ESCAPE) CON BIOCOMBUSTIBLE GASEOSO

El gas metano presente en el biogás se puede mezclar fácilmente con el aire, aplicando SCR (reducción catalítica selectiva) (Figura 3), es una tecnología para reducir el NO_x.

Estos dispositivos en vehículos, tienen el inconveniente que debe estar instalado en el tubo de escape y son catalizadores caros (Figura 4). Por lo tanto, pueden resultar una mejor opción el EGR, el cual es capaz de bajar la temperatura en la cámara de combustión, y por lo tanto reducir el NO_x a bajo costo (Wang *et al.*, 2018).

Las altas emisiones de NO_x especialmente en altas cargas, y la tendencia a golpear (Lee *et al.*, 2014), se reducen con la recirculación de los gases de escape (EGR), pero también se traduce en un aumento de HC y CO. Las tasas de EGR por encima de un valor máximo, dan como resultado un fallo de encendido y un funcionamiento errático del motor (Korakianitis *et al.*, 2011).

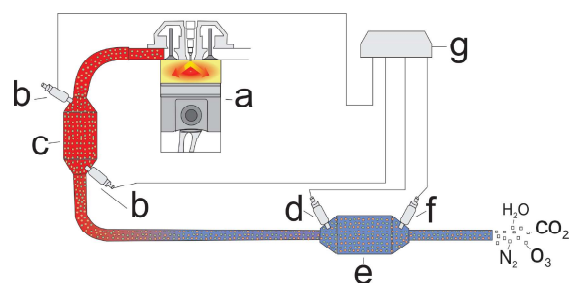


Figura 4: Catalizador de 3 vías en a) Combustión de biogás, b) Sensor de oxígeno, c) Catalizador de 3 vías, d) Termómetro, e) Catalizador de NO_x, f) Sensor de NO_x, g) Unidad de control electrónico. Fuente: Elaboración propia.

6. GAS NATURAL COMO ADITIVO PARA EL BIOCOMBUSTIBLE

La administración de información de energía de EE UU, predice que el consumo de gas natural crecerá en todo el mundo a partir de 108 billones de m³ en 2007 a 156 trillones de m³ para el año 2035, por lo que este crecimiento conducirá a la propagación de las redes de gas natural, esta expansión puede permitir, que las fuentes de biogás y syngas estén conectadas con ellas (Uusitalo *et al.*, 2013). Si se llega a unir a la red de gas natural, muchos autos de combustión de gasolina o diésel, podrían estar cambiando a la conversión de gases combustibles. Por lo tanto, el uso de syngas y biogás en el transporte, puede ser conveniente para los automóviles de pasajeros y para vehículos pesados (Uusitalo *et al.*, 2013). Desafortunadamente el remplazo completo de combustible diésel con syngas no podría ser posible, además que el rendimiento de doble combustible de syngas y diésel como combustible piloto, es más pobre en comparación a la doble alimentación de gas natural y diésel. Por lo tanto, el syngas solo puede ser utilizado como combustible suplementario para reducir costo y reducir emisiones de NO_x y partículas (PM) (Hagos *et al.*, 2014). La mezcla de biogás/gas natural, no requiere de modificaciones en el motor para un funcionamiento estable en la cámara de combustión (Nikpey *et al.*, 2014). De acuerdo con Nikpey *et al.* (2014), quemar con una mezcla de gas natural y biogás, contribuye a la reducción del CO₂ en un 19% en la operación a plena carga. En el estudio de Mustafi *et al.* (2013), realizaron un estudio comparativo entre los motores alimentados con biogás y gas natural, en donde reportaron una reducción del 12% del NO_x y otra reducción del 70% de PM, en la operación de gas natural-diésel, en donde las emisiones de HC fueron mayores para el biogás, debido a la presencia de CO₂. También se observaron un aumento de BSFC y un retraso de ignición, cuando se introdujo biogás en el motor, esto fue proporcional a la cantidad de CO₂ presente en los gases de escape. En la evaluación comparativa de Wagemakers & Leermakers (2012), investigaron diversos combustibles gaseosos (syngas, CNG, LPG y H₂) en combustión dual en motor diésel. Los resultados mostraron que el incremento del NO_x, se encontró con el uso de syngas y de hidrógeno. En el trabajo experimental de Chandra *et al.* (2011), estudiaron un motor diésel (convertido inicialmente en motor a gasolina) en modo de alimentación de gas natural, en donde enriquecieron al biogás con gas natural. Esta mezcla mostró en el motor, un comportamiento similar (al gas natural), en términos de potencia de frenado, salida, consumo específico de gas y eficiencia térmica. Finalmente, en el estudio de Mamilla *et al.* (2011), analizaron el rendimiento del motor de gasolina de 4 tiempos, alimentado con una mezcla de biogás/LPG, en un solo

cilindro y enfriado por aire. Los resultados mostraron que con una mezcla del 50 % de biogás en el motor, obtuvo un rendimiento muy adecuado, con altos índices de BSFC y BTE, en comparación con la gasolina única.

7. BIOCOMBUSTIBLE GASEOSO ENRIQUECIDO CON HIDRÓGENO

Si bien se sabe, que la combustión de biogás en motor diésel, tiene el potencial de proporcionar bajas emisiones, la presencia de CO₂ en el biogás, provoca unos aumentos en los periodos de demora de encendido, y reduce las velocidades de propagación de la llama, lo que genera una caída en la eficiencia térmica del motor. Una forma potencial de contrarrestar este hecho, sin tener un efecto adverso sobre los niveles de emisiones, es agregar H₂ a la mezcla de biogás, en donde la velocidad de la llama de H₂ (23 cm/segundo) es aproximadamente 6 veces mayor que la de CH₄(42 cm/s) en condiciones atmosféricas (Karim, 2003). La mezcla de hidrógeno-metano tiene un límite de llama y velocidad de combustión más rápida, en comparación con el metano puro, el cual es 5 veces mayor que la del metano, lo que puede llevar a una combustión más completa y menor tiempo de duración de la combustión (Açıkgöz *et al.*, 2015). Tecnologías como la turbo -carga, tiempo de inyección avanzado, alta presión en inyección, mayor relación de compresión y la adición de hidrógeno en el combustible gaseoso, pueden lograr un mejor rendimiento en el motor de doble combustible (Nataraj *et al.*, 2016). El hidrógeno tiene el mayor contenido de energía entre todos los combustibles, y tiene muchas ventajas tales como; una alta velocidad de llama, corta distancia de enfriamiento, alto valor calorífico y alta difusividad, que podría llevar a una alta eficiencia de combustión (Babu *et al.*, 2013). Se puede lograr una mejora en la eficiencia, y a la vez reducir emisiones, si se usa syngas y biogás, con un mayor contenido de hidrógeno en motores de combustión dual en condiciones adecuadas, además se puede utilizar el syngas como combustible complementario, con la finalidad de reducir el costo y las emisiones de NO_x y PM (Haghighi & Tabrizi , 2013). El gas de carbón, por ejemplo, es desfavorable al usarlo en cualquier cámara de combustión, esto se debe a la gran cantidad de nitrógeno que tiene, por lo que se puede enriquecer con hidrógeno, para convertirse en un combustible aplicable (Ilbas & Karyeyen *et al.*, 2015). La presencia de syngas enriquecido tanto con hidrógeno como con metano, crea un motor más suave, la operación y el rendimiento final del motor son mejorados (Hagos *et al.*, 2017).

7.1. Mezcla de biogás-syngas/H₂ y la eficiencia del motor

Diversas investigaciones señalan, que la adición de una pequeña cantidad de combustible que tenga mayor rango de inflamabilidad, mayor velocidad de la llama y mayor valor calorífico (como el hidrógeno y el gas licuado de petróleo), pueden mejorar el rendimiento de los biocombustibles gaseosos, tales como el biogás y el syngas. Pequeñas dosis (dosificación) de hidrógeno son una forma muy efectiva de mejorar las cualidades de los biocombustibles gaseosos, tanto el syngas y el biogás cuando estos son producidos por métodos no estandarizados (Chraplewska *et al.*, 2011), en la Tabla 3 se presentan las dosis del enriquecimiento con hidrógeno en biocombustibles gaseosos.

Tabla 3: Porcentajes de hidrógeno con biocombustibles gaseosos

Tipo de combustible	Hidrogeno %	Argumento	Referencia
Biogás	15 %	Mejoró la potencia y eficiencia térmica y se redujo el HC	Porpatham <i>et al.</i> (2007)
Gas metano	10%	Se redujo la irreversibilidad de la combustión	Rakopoulos <i>et al.</i> (2006)
Biogás y gas de síntesis	30%	Mayor eficiencia térmica, cuando se agrega EGR	Park <i>et al.</i> (2012)
Gas metano	20%	Porcentaje óptimo para mejorar eficiencia y reducción de emisiones	Wang <i>et al.</i> (2007)
Gas productor	20%	Mayor eficiencia térmica de los frenos	Roy <i>et al.</i> (2009)
Gas metano	5.3 %	Se redujo las emisiones de HC, CO y CO ₂ (motor rotativo)	Ji <i>et al.</i> (2016)

Cuando se aplica el hidrógeno, la duración de la combustión se reduce, lo que lleva a una mayor eficiencia (Khatry *et al.*, 2020). La presencia de hidrógeno en syngas, provoca una combustión rápida y una presión mas alta en el cilindro (Haghighi & Tabrizi , 2013). Por lo que se ha encontrado que la presencia de hidrógeno en combustibles gaseosos (syngas) ha logrado eficiencias similares al gas natural (Cameretti *et al.*, 2020). Sin embargo, cuando el contenido de hidrógeno en el syngas es demasiado alto, puede generar muchos problemas, esto se debe a que la combustión se puede volver inestable, generando un aumentó de presión excesivo. Por lo que el motor puede se puede llegar a golpear, este último fenómeno lo explican Sivabalakrishnan *et al.* (2014), en donde señalan, que el fenómeno del golpe, es debido a una menor ignición de energía, mayor rango de inflamabilidad y menor distancia de enfriamiento. El resultado de todo esto, es una disminución de la eficiencia del motor, además que las partes del motor pueden dañarse severamente. Por lo tanto, el contenido de hidrógeno, se reconoce como un factor crucial que afecta el rendimiento del motor alimentado con syngas. Aunque la tasa de propagación de hidrógeno, puede ser moderada con la presencia de diluyentes del syngas, como el N₂ y CO₂ (Kan *et al.*, 2018). La mezcla de H₂ con biogás, puede mejorar la estabilidad de combustión de la llama (Yan *et al.*, 2017), mejora la estabilidad operativa del motor (Xin *et al.*, 2013), así como el rendimiento del motor y emisiones (Park *et al.*, 2012). De acuerdo con Zhen *et al.* (2016), observaron un efecto favorable en la adición de hidrógeno sobre la estabilidad de la llama, y un efecto perjudicial de la concentración de dióxido de carbono. El hidrógeno promueve eficazmente la combustión magra, y un amplio rango de operación estable del motor, esto es debido a que la velocidad de propagación de la llama del hidrógeno, es relativamente rápida, lo que ayuda a las condiciones de operación pobres (syngas). Las emisiones de NO_x aumentan a medida que se incrementa el hidrógeno, esto es debido a que el hidrógeno eleva la temperatura de combustión, y el NO_x es producido por la alta temperatura de combustión, por lo que la presencia de N₂ y CO₂ del syngas, ayuda a disminuir esa emisión, y también permite que se apliquen condiciones de quemadura magra (Jeong *et al.*, 2009). De acuerdo con el trabajo de Azimov *et al.* (2011), utilizaron syngas de biomasa, y encontraron que cuanto mayor H₂ agregan

al syngas, menores emisiones de HC se generan. Pero al mismo tiempo se incrementa el NO_x, esto último se explica, por la mayor temperatura de ignición. En el caso de la reducción de HC sucede, al generar una mejor combustión. En un estudio comparativo entre syngas y biogás agregando H₂ lo presentó, Hagos *et al.* (2014a), donde demostraron que el syngas puro, es un buen sustituto de los combustibles fósiles gaseosos en motores a gasolina. Con el aumento de H₂ y una reducción de CO₂ en la mezcla con syngas alimentado a motor a gasolina, el motor tuvo mejor comportamiento de combustión, en comparación con los motores alimentados con biogás (Arroyo *et al.*, 2014; Arroyo *et al.*, 2015).

7.2. La relación de biogás/CO₂ con respecto a sus emisiones con H₂

La adición de H₂ mejora el BMEP (presión media efectiva al freno), el BTE, con una reducción de CO, HC y una reducción de NO_x (con la presencia de CO₂), en una relación de H₂-biogás (Chen *et al.*, 2017). Las emisiones de CO₂ disminuyen, a medida que se incrementa el hidrógeno en la mezcla con biogás. El agregar hidrógeno al biogás, puede ser muy beneficioso, pero la cantidad debe ser controlada adecuadamente, porque la mezcla de biogás con H₂, puede ocasionar un aumento del NO_x, así como la eficiencia y la máxima presión del cilindro, puede cambiar simultáneamente (Jeong *et al.*, 2009), por lo que algunas características de H₂, puede causar resultados indeseables, como aumentos inesperados de NO_x y deterioro en la eficiencia térmica, debido a las significativas pérdidas de calor, en condiciones de alta mezcla de H₂, y una tendencia de golpes (Porpatham *et al.*, 2007). Por lo que el biogás con hidrógeno, podría llegar a generar un aumento en las emisiones (Hosseini *et al.*, 2014), todo esto dependerá en intentar mantener niveles controlados de H₂. De acuerdo con el análisis de Park *et al.* (2011a), concluyeron que la mezcla de hidrógeno con biogás, es eficaz para inhibir las reacciones de crecimiento de los anillos aromáticos del benceno, y de la superficie de los HAP (Zhao *et al.*, 2010). En el estudio de Park *et al.* (2011), aplicaron biogás (20% CH₄ y 80% H₂) y confirmaron que usando niveles moderados de H₂, la emisión total de HC reduce, logrando un aumento en la estabilidad de la combustión. Sin embargo, puede generar un incremento de NO_x (Jeong *et al.*, 2009). Por otro lado, en el estudio de Lilik *et al.* (2010) y Talibi *et al.* (2014), afirman que el uso de biogás con H₂ puede reducir las temperaturas del gas en el cilindro, reduciendo así los NO_x, es por ello que es muy importante determinar la dosis adecuada de biogás/H₂.

7.3. Aplicación de biogás/H₂ en motor a gasolina

El motor alimentado con gas, con bajo poder calorífico (como el biodiésel), y encendido por chispa, tiene la desventaja de grandes variaciones de ciclo por ciclo, y una capacidad de quemado pobre, ocasiona una disminución en la potencia de salida del motor, y un aumento del consumo de combustible. Sin embargo, el hidrógeno tiene una alta velocidad de propagación de la llama, y un amplio alcance inflamable, por lo que se espera que esta mezcla biogás/H₂, mejore las condiciones del motor (Zhunqing & Xin, 2012), en la Tabla 4, se observan las dosis de hidrógeno en motor a gasolina.

De acuerdo con el trabajo realizado por Lee *et al.* (2010a), compararon la combustión y emisión del gas natural, biogás y la mezcla de biogás/H₂ bajo diferentes EGR en motor a gasolina, llegaron a la conclusión,

Tabla 4: Porcentaje de hidrógeno con biocombustibles gaseosos en motor a gasolina

Tipo de biocombustible	Hidrógeno %	Argumento	Referencia
Gas metano	20-25 %	Mejora el rendimiento y evita el golpe	Shrestha <i>et al.</i> (1999)
Biogás enriquecido con gas metano	10 %	La eficiencia térmica y la potencia de salida mejoran, y la emisión de HC disminuye	Porpatham <i>et al.</i> (2012)
Gas metano	20-25 %	Tuvo una ganancia de potencia y evita el golpe	Porpatham <i>et al.</i> (2007)
Biogás	15 %	Promueve el grado de reversibilidad del proceso de combustión	Rakopoulos <i>et al.</i> (2009)
Biogás	15 %	Mejoró la eficiencia térmica del freno y la potencia de salida	Porpatham <i>et al.</i> (2007)
Biogás	5-10 %	Mejora la eficiencia térmica y reduce el HC, pero incrementa el NOx	Park <i>et al.</i> (2011)
Biogás	15 %	Aumenta la eficiencia y reduce la irreversibilidad de la combustión	Rakopoulos <i>et al.</i> (2008)

que el NOx y la eficiencia disminuye, cuando se alimenta con biogás. Cuando se trata del gas natural, este también disminuye ligeramente el NOx y la eficiencia, pero en el caso del biogás con H₂, NOx y la eficiencia aumentan.

8. MEJORAMIENTO DE LA CALIDAD DEL BIOGÁS

La razón en mejorar la calidad del biogás, es debido a que el biogás crudo, tiene un menor valor calorífico, es difícil y costoso licuarlo, ya que requiere una compresión muy alta, lo que hace a su vez que, a mayor peso del cilindro, afecte su portabilidad (Shah - Divyang, 2016) en la Figura 5 se muestra las condiciones de cómo se puede licuar el biogás.

La eliminación o reducción de CO₂, mejora los límites de inflamabilidad, y mejora la velocidad de la llama, logrando así una mejor eficiencia térmica, reduciendo a la vez las emisiones (Kapdi *et al.*, 2005; Porpatham *et al.*, 2008). El número de octano, es una medida de resistencia a la auto-ignición (comúnmente conocida como detonación). Un mayor octanaje, indica una mayor resistencia a la auto-ignición, que a su vez permite utilizar relaciones de compresión más altas, las cuales dan como resultado una mayor eficiencia térmica (Korakianitis *et al.*, 2011). La mayoría de los países, tienen como indicador principal de la calidad del biogás, a la concentración de metano. La cual debe ser al menos un 96%, y el CO₂ no debe exceder el



Figura 5: Condiciones para licuar el biogás. Fuente: Elaboración propia.

4%. El índice de Wobbe, es un indicador para el combustible, que mide un valor de calentamiento, el cual se puede utilizar comparativamente entre diferentes gases (Makareviciene *et al.*, 2013). El biogás tiene un menor costo por unidad de energía, en comparación con la gasolina y el hidrógeno (Kukoyi *et al.*, 2015). El biogás en su estado más puro (más del 95% de metano), tiene valores caloríficos similares a los del gas natural, y puede ser utilizado en todas las aplicaciones de gas natural existentes (Persson *et al.*, 2014). Una simulación numérica de Software de simulación Aspen HYSYS, puede servir para alcanzar la máxima pureza del metano a partir del biogás (Elfattah *et al.*, 2016). El futuro del biogás se centra principalmente en la materia prima, y en las directrices para purificar el biogás (Kadam *et al.*, 2017).

8.1. Tipos de tratamiento para purificar el biogás

Aunque la producción del biogás es un asunto de desarrollo comercial, su utilización en todo el mundo es todavía muy limitado, esto es debido a sus rigurosos requisitos de purificación (Figura 6) antes de su uso (Ullah-Khan *et al.*, 2017). En el estudio de Lindeboom *et al.* (2011), han sugerido que el costo de purificación del biogás, solo se convierte viable, económica y energéticamente, si la capacidad operativa de la planta supera los 100 m³ de biogás/h. El enfoque tecnológico del biogás, se ha enfocado en su pureza, el cual se ha sometido el biogás a una serie de técnicas, como el secado (la presencia de humedad del biogás puede corroer las partes metálicas del motor) (Shah - Divyang, 2016) y la eliminación de CO₂, NH₃, H₂S y otras impurezas traza, para lograr un contenido de metano del 95-99% en el biogás (Sarker *et al.*, 2018). En la Tabla 5 se muestran métodos para eliminar el H₂S el cual está presente en el biogás.

Una técnica práctica para eliminar el olor y el H₂S del biogás, es usar un lecho de carbón activado, y para eliminar la humedad del biogás, se puede usar una alúmina activada (Hernández & Villanueva, 2018). En el análisis de Chen *et al.* (2015), revelaron que, en los procesos híbridos con biogás, obtienen mejores resultados cuando se combinan la separación de membrana con absorción, adsorción y la técnica criogénica. Estos procesos de separación combinados pueden mejorar su funcionamiento, y a la vez reducen el costo del proceso, en la Tabla 6 se muestran técnicas para tratar el biogás.

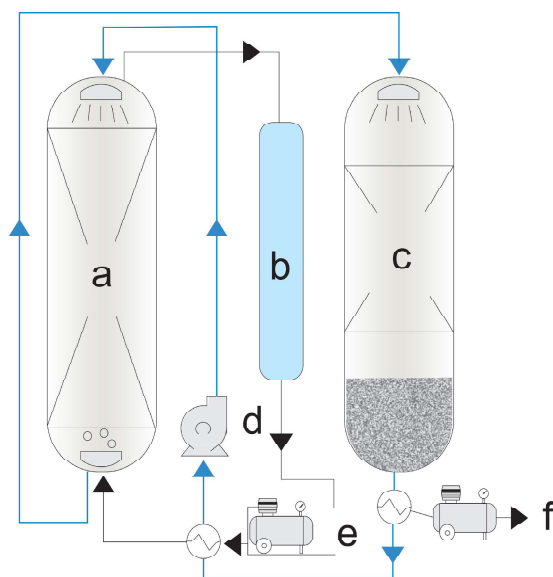


Figura 6: Esquema utilizado para la purificación de biogás con agua de presión; a) torre de lavado de biogás, b) secado, c) torre de remoción de gases, d) bomba, e) compresor, biogás sucio y f) compresor, biogás limpio. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5: Métodos de desulfuración económicos para eliminar el H₂S de biocombustible gaseosos (Piaptmanomai *et al.*, 2009)

Tipo de tratamiento	Observación
Sistema de eliminación de líquidos	Uso de residuos a base de aminas de agua
Sistema de captación de medios sólidos	Basado en cerámica con óxido de hierro impregnado, usando una pirita de hierro
Redox de hierro	Utilizado con hierro como catalizador regenerativo para la oxidación de H ₂ S

Tabla 6: Distintos tipos de métodos de tratamiento para purificar el biocombustible gaseoso

Tipo de Método	Observaciones	Referencia
Absorción química	Es muy usada, se realiza en una columna empaquetada con solución salina	Kapdi <i>et al.</i> (2005)
Separación por membrana	Es un método muy prometedor tanto técnico, económico y ambientalmente	Kim <i>et al.</i> (2016), Kapdi <i>et al.</i> (2005), Ullah-Khan <i>et al.</i> ,2017
Separación criogénica	Es un método costoso para usar	Kadam <i>et al.</i> (2017), Kapdi <i>et al.</i> (2005), Ullah-Khan <i>et al.</i> ,2017
Lavado de agua a alta presión	Es el método más comúnmente usado, el cual se requiere de mucha agua	Ullah-Khan <i>et al.</i> (2017) Shah - Divyang (2016), Kadam <i>et al.</i> (2017)
Lavado con solvente orgánico	Es el mismo principio del lavado de agua, pero se le agrega un solvente orgánico, es más eficiente, pero más costoso	Tock <i>et al.</i> (2010)
Adsorción de oscilación de presión	El método se basa en una alta presión, es un método muy flexible, pero costoso	Cavenati <i>et al.</i> (2005) Kadam <i>et al.</i> (2017)
Membrana de transporte de iones (ITM)	Muy efectivo y más económico que la separación criogénica	Porpatham <i>et al.</i> (2017)
Agua presurizada como absorbente	Método sencillo y no costoso	Yingjian <i>et al.</i> (2014)
Biofiltros	Se emplean bacterias en un biorreactor, es un método eficiente, pero en desarrollo	Fernandez <i>et al.</i> (2013)
Tratamiento de gas amina (absorción de amina)	Se usa en refinerías y centrales eléctricas, tiene alta eficiencia, pero es costoso y complejo	Kadam <i>et al.</i> (2017) Gomes & Yee (2002)
Enriquecimiento de metano in situ	Se logra una eficiencia del 60%, con una gran cantidad de lixiviados a tratar, método en desarrollo	Hayes <i>et al.</i> (1990)

9. EFICIENCIA DEL BIOGÁS ENRIQUECIDO CON METANO

Usar como materia prima los residuos, es adecuado en el contexto del biogás, debido a que no compiten con los productos alimentarios agrícolas (Appes *et al.*, 2011). Una ruta alternativa desarrollada en las últimas décadas, es la utilización del biogás, con un nivel mayor de metano, esto puede ser utilizado como biometano comprimido localmente, o como combustible renovable, directamente inyectado en la red del gas natural (Sun *et al.*, 2015), el cual ha demostrado un interés comercial en pleno crecimiento (Sarker *et al.*, 2018). El biogás enriquecido con metano, proporciona un rendimiento similar a GNC fósil. El biogás enriquecido, se podría utilizar para combustible para vehículos, ya que no se requiere de una instalación compleja, que suministre el combustible de gas en el motor. Sin embargo, si se usan dosis altas de combustible de gas, se puede esperar una disminución sustancial en la potencia del motor, como consecuencia, puede ser apropiado usar una dosis baja de biogás (alrededor del 40-60% dependiendo de la carga), para que obtenga una potencia del motor relativamente alta, y de esta manera reducir los costos operativos para vehículos y máquinas. La propiedad de biogás purificado, es similar a la GNC, y se puede utilizar en vehículos operados con GNC sin ninguna modificación al motor (Barik *et al.*, 2017). El gas enriquecido con metano, es tan bueno como el gas natural, y además el biogás es un combustible renovable, y tiene un CO₂ neutral en términos de emisiones netas de carbono a la atmósfera (Kirti *et al.*, 2017). El biogás emite menos cantidades de NO_x, HC y CO, que la gasolina o el diésel además que, los motores alimentados con biogás purificado, son más silenciosos (Prajapati *et al.*, 2015). Un análisis del efecto de diferentes composiciones de biogás en motor de combustión dual, fue realizado por Verma *et al.* (2017), ellos encontraron que con una composición de biogás del 93% de metano, dio como resultado, un rendimiento comparable con el combustible diésel con 26.9% y 27.4% respectivamente, en la eficiencia de la segunda ley. Sin embargo, el biogás con menores porcentajes de metano, puede mostrar menor eficiencia, junto con el aumento de las destrucciones de exergía. En el análisis de Porpatham *et al.* (2012), investigaron el efecto de la concentración de metano en el biogás, usando un motor a gasolina y encontraron que, con el aumento del porcentaje de volumen de metano, las emisiones de HC disminuyeron significativamente, mientras que las emisiones de NO_x se mantuvieron casi fijas. La eficiencia térmica también aumentó, mientras que el tiempo de encendido, debería ser pospuesto como una estrategia para controlar la variación cíclica. En el estudio de Chandra *et al.* (2011), analizaron experimentalmente la velocidad constante en términos de potencia de frenado, el biogás que contiene 95% de metano (llamado biogás enriquecido con metano), exhibió un rendimiento del motor similar al gas natural comprimido. Los resultados que presenta Jung *et al.* (2015), mostraron que el comportamiento de combustión mejoró, cuando se le aumentó el metano en el biogás, el BTE, la potencia del freno y las emisiones de NO_x aumentaron, a medida que el contenido de metano incrementaba. Una manera de reducir emisiones lo presenta, Montoya *et al.* (2015), en donde realizaron una investigación, donde un motor diésel se transformó en motor a gasolina, con suma potencia de salida máxima de 8.5W, con la finalidad de solo aplicar biogás. Su experimento se basó en 3 combustibles; biogás simulado, biogás enriquecido con 25% y 50% de metano en volumen. Los resultados mostraron una reducción considerable de NO_x, CO y HC, cuando el biogás se enriqueció con metano al 50%. En el estudio de Subramanian *et al.* (2013), realizaron una evaluación en un vehículo de

encendido por chispa automotriz, alimentado con biogás enriquecido con metano y GNC utilizando un dinamómetro de chasis, las emisiones CO, HC y NOx fueron ligeramente más altas con el biogás enriquecido, que con el combustible GNC base. Pero los resultados experimentales indican, que la emisión del vehículo con el combustible de biogás enriquecido cumple con las normas de emisión BS IV. No hubo un cambio significativo en la economía del combustible del vehículo alimentado con gas enriquecido (24.11 km/kg), en comparación con el combustible GNC base (24.38 km/kg). Dado que el biogás enriquecido con metano proporciona un rendimiento similar al de un GNC fósil, el biogás enriquecido, se podrá usar como combustible para vehículos después de eliminar el CO₂ y el H₂S, por medio del lavado, el biogás se enriquece en metano y se vuelve equivalente al gas natural. El biogás enriquecido con metano, tiene emisiones de HC, CO y NOx ligeramente mayores que el GNC, el biogás enriquecido, sin embargo, presenta un rendimiento similar a GNC, y podría utilizarse como combustible en el motor de encendido con chispa (Faria *et al.*, 2017).

10. APLICACIÓN DE BIO-CNG EN VEHÍCULOS

El uso de GNC en motores diésel y a gasolina, ha sido ampliamente aplicado en la presente década (Verma *et al.*, 2017), sin embargo, las reservas de gas natural han disminuido en los últimos años, y pueden provocar una crisis de disponibilidad de GNC para el 2030 (Li *et al.*, 2015). El biogás se puede convertir a biometano, a través de diferentes tecnologías, para aplicarlo directamente como combustible de transporte en motores de vehículos de gas natural (GNV), que están ampliamente disponibles. La infraestructura para vehículos de gas natural comprimido, están ampliamente disponibles, y brindan oportunidades para el empleo del biogás en el transporte (European Commission, 2020). En el futuro habrá muchos vehículos en el mundo, que funcionen con biogás o biometano, también conocido como gas natural renovable. El biometano limpio se puede comprimir para aumentar su utilidad, este se llama gas natural biocomprimido (bio-CNG), y se puede alimentar directamente a los vehículos de transporte (Kadam *et al.*, 2017). El bio-CNG, tiene las mismas propiedades que el CNG, en términos del rendimiento del motor, consumo de gas y eficiencia, cuando se aplica como combustible vehicular, (Lim *et al.*, 2015; Rahbari, 2014). De acuerdo con Poeschl *et al.* (2010), señalaron que la entrega de biogás a través de la red de gas natural para el uso de vehículos, es la forma más prometedora de utilizar el biogás. El bio-CNG es ampliamente usado en Suecia, Italia, Alemania, Suiza, Francia, Austria, Países Bajos e Inglaterra, los cuales lo usan como combustible vehicular, inclusive Suecia, fue pionera en el empleo del 73% de biometano en vehículos a GNC en 2015 (Vijay *et al.*, 2015). Con las concentraciones de metano en el biogás de al menos el 97%, se han aplicado en 64 autobuses, y vehículos automotores pesados y livianos en Suecia. El uso de biogás, se ha generado desde el 2002 solo en el transporte urbano, y con esto se han reducido las emisiones de CO₂ en 9000 t/año (Makareviciene *et al.*, 2013). No hay diferencia significativa entre bio-CNG y GNC, con respecto al nivel de emisión de CO₂, sin embargo, los niveles de emisión de NOx, HC y CO para bio-GNC, son ligeramente más altos, comparándolos con GNC, en aplicaciones como combustible vehicular (Patterson *et al.*, 2011), Subramanian *et al.* (2013). Para vehículos pesados, el uso de bio-GNC, es muy ventajoso, ya que tiene mayor poder calorífico, y es más

respetuoso con el medio ambiente, en comparación con cualquier otro combustible. El aplicar bio-GNC en vehículos, genera menores emisiones de CO_2 , comparándolo con los combustibles fósiles (Thamsiriroj *et al.*, 2011). Hay una reducción del 63% en la emisión de GI, cuando bio-GNC es utilizado en lugar de GNC, para vehículos pesados (Uusitalo *et al.*, 2013; ?). Después de la eliminación de componentes no deseados de biogás, y al quedar un 97% de CH_4 , con esto se puede convertir al gas natural biocomprimido (bio-GNC), con 20-25 MPa (2900-3600 psi) (Molino *et al.*, 2013; Farzaneh-Gord & Branch, 2011), y almacenar en un cilindro de gas, lo que ayuda a facilitar el reabastecimiento rápido de los cilindros, si el gas no se comprime, el volumen del gas contenido en el cilindro será menor, por lo que el motor funcionará durante un periodo corto de tiempo (Ray *et al.*, 2013). La compresión también reduce su volumen de almacenamiento, con alta energía y presión. A pesar de que la compresión en alta presión es cara, el alto valor del bio-GNC es valioso, el cual puede justificar su costo (Elberry *et al.*, 2021). Desde un punto de vista práctico, el almacenamiento de gas comprimido, es lo más común y razonable. Al comprimir el biogás, se reduce el almacenamiento, se concentra el contenido energético, se puede almacenar en tanques herméticos de acero, para su uso futuro (Weiland, 2010), y con esto puede aumentar el nivel de presión requerido, para superar la resistencia al flujo de gas (Singh *et al.*, 2016). Finalmente, en el análisis de Chandra *et al.* (2011), informaron en un estudio sobre el rendimiento de un motor, originalmente estacionario CI de 5.9 kW, ahora convertido en motor a gasolina. El funcionamiento del motor fue con GNC y bio-GNC. Los resultados revelaron que el bio-GNC, mostró un rendimiento muy similar al GNC, en términos de potencia de frenado, consumo específico de gas y eficiencia térmica.

11. CONCLUSIONES

La aplicación del biogás y el syngas crudo puede ser empleado para las zonas rurales, puesto que resulta muy atractivo su empleo debido a su escasa inversión, se pueden llegar a obtener un recurso energético de buen valor. Para la utilización del biogás y el syngas a escala comercial, representa muchos retos, pero estos se pueden solucionar con una buena estrategia del mejoramiento del combustible, así como el desarrollo de su tecnología. La aplicación del biogás con hidrógeno, se puede presentar como el complemento ideal, puesto que, si al biogás le falta valor calorífico, pero le sobra gases inertes para evitar el fenómeno del golpe en el motor. De forma inversa el hidrógeno le ocurre exactamente lo contrario, tiene un alto valor calorífico, pero puede padecer de detonaciones, por lo que un complemento de ambos, es muy benéfico para el motor.

Contribución de los autores

Todos los autores participaron en la concepción del manuscrito y en su elaboración, diseño y escritura.

Referencias

- Açıkgöz, B., Çelik, C., Soyhan, H. S., Gökalp, B. & Karabağ, B. (2015). *Emission characteristics of an hydrogen-CH₄ fuelled spark ignition engine*. *Fuel*, 159, 298–307.
- Appels, L., Lauwers, J., Degreve, J., Helsen, L., Lievens, B., Willems, K., Impe, J. V. & Dewil, R. (2011). Anaerobic digestion in global bio-energy production: potential and research challenges. *Renew Sustain Energy Rev*, 15(9), 4295–4301.
- Arroyo, J., Moreno, F., Muñoz, M., Monné, C. & Bernal, N. (2014). Combustion behavior of a spark ignition engine fueled with synthetic gases derived from biogas. *Fuel*, 117, 50–58.
- Arroyo, J., Moreno, F., Muñoz, M. & Monné, C. (2015). Experimental study of ignition timing and supercharging effects on a gasoline engine fueled with synthetic gases extracted from biogas. *Energ Convers Manag*, 97, 196–211.
- Asam, Z. Z., Poulsen, T.G., Nizami, A. S., Rafique, R., Kiely, G. & Murphy, J. D. (2015). How can we improve biomethane production per unit of feedstock in biogas plants. *Appl. Energy*, 88 (6), 2013–2018.
- Azimov, U., Tomita, E., Kawahara, N. & Harada, Y. (2011). Effect of syngas composition on combustion and exhaust emission characteristics in a pilot ignited dual-fuel engine operated in PREMIER combustion mode. *Int J Hydrogen Energy*, 36(18), 11985–11996.
- Babu, M. K. G. & Subramanian, K. A. (2013). Alternative transportation fuels, utilisation in combustion engines. CRC Press, *Taylor & Francis Group*. <https://doi.org/10.1201/b14995>
- Bari, S. (1996). Effect of carbon dioxide on the performance of biogas /diesel dual-fuel engine. *Renewable Energy*, 9(1–4), 1007–1010. [https://doi.org/10.1016/0960-1481\(96\)88450-3](https://doi.org/10.1016/0960-1481(96)88450-3)
- Barik, D., Murugan, S., Samal, S. & Sivaram, N.M. (2017). Combined effect of compression ratio and diethyl ether (DEE) port injection on performance and emission characteristics of a DI diesel engine fueled with upgraded biogas (UBG)-biodiesel dual fuel. *Fuel*, 209, 339–349. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.08.015>
- Byun, J.S. & Park, J. (2015). Predicting the performance and exhaust NOx emissions of a spark-ignition engine generator fuelled with methane based biogas es containing various amounts of CO₂. *J Nat Gas Sci Eng*, 22, 196–202. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2014.11.031>
- Cacua, K., Amell, A. & Cadavid, F. (2012). Effects of oxygen enriched air on the operation and performance of a diesel-biogas dual fuel engine. *Biomass Bioenergy*, 45, 159–167. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.06.003>

- Cameretti, M.C., Cappiello, A., De Robbio, R., & Tuccillo, R. (2020). Comparison between Hydrogen and Syngas Fuels in an Integrated Micro Gas Turbine/Solar Field with Storage. *Energies*, 13, 4764, 1–24 <https://doi:10.3390/en13184764>.
- Cavenati, S., Grande, C. & Rodrigues, A. (2005). Upgrade of methane from landfill gas by pressure swing adsorption. *Energy Fuels*, 19(6), 2545–2555. <https://doi.org/10.1021/ef050072h>
- Chandra, R., Vijay, V. K., Subbarao, P. M. V. & Khura, T. K. (2011). Performance evaluation of a constant speed IC engine on CNG, methane enriched biogasaand biogas. *Appl Energy*, 88(11), 3969–3977. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.04.032>
- Chandra, R., Vijay, V. K., Subbarao, P. M. V. & Khura, T. K. (2012). Production of methane from anaerobic digestion of jatropha and pongamia oil cakes, *Appl. Energy*, 93, 148–159. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.10.049>
- Chraplewska, N., Duda, K. & Meus, M. (2011). Evaluation of usage brown gas generator for aided admission of diesel engine with fermentative biogas and producer gas. *Journal of KONES Powertrain and Transport*, 18 (3), 53–60.
- Chen, L., Song, P., Zeng, W., Zhang, J., Feng, C. & Ma, H. (2016). Exhaust emission characteristics of gaseous low-temperature biomass fuel in spark-ignition engine. *Applied Thermal Engineering*, 108, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.07.115>
- Chen, X., Vinh-Thang, H., Ramirez, A.A., Rodrigue, D. & Kaliaguine, S. (2015). Membrane gas separation technologies for biogas upgrading. *RSC Adv*, 5(31), 24399–24448. <http://dx.doi.org/10.1039/C5RA00666J>.
- Chen, L., Long, W. & Song, P. (2017). Combustion characteristics of an SI engine fueled with biogas fuel. *AIP Conference Proceedings*, 1834(1), 1–4. <https://doi.org/10.1063/1.4981596>
- Dasappa, S. & Sridhar, H.V. (2013). Performance of diesel engine in a dual fuel mode using producer gas for electricity power generation. *Int J Sustain energy*, 32(3), 153–68, <http://dx.doi.org/10.1080/14786451.2011.605945>.
- Duarte, J., Amador, G., Garcia, J., Fontalvo, A., Vasquez R., Sanjuan, M. & Gonzalez, A. (2014). Auto-ignition control in turbocharged internal combustion engines operating with gaseous fuels, *Energy*, 71, 137–147, ISSN 0360-5442, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.04.040>.
- Elberry, A. M., Thakur, J., Santasalo-Aarnio, A. & Larimi, M. (2021). Large-scale compressed hydrogen storage as part of renewable electricity storage systems, *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(29), 15671–15690, ISSN 0360–3199, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.02.080>.

- Elfattah, S. T. A., Eldrainy, Y. A. & Attia, A. (2016). Upgrade Egyptian biogas to meet the natural gas network quality standard. *Alexandria Engineering Journal*, 55(3), 2279–2283. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2016.05.015>.
- European Commission (2020). Directorate-General for Maritime Affairs and Fisheries, Directorate-General for Mobility and Transport, Joint Research Centre, State of the art on alternative fuels transport systems in the European Union: 2020 update, *Publications Office*, <https://data.europa.eu/doi/10.2771/29117>
- Faria, M. M., Bueno, J., Ayad, S. M. & Belchior, C.R. (2017). Thermodynamic simulation model for predicting the performance of spark ignition engines using biogas as fuel. *Energy Conversion and Management*, 149, 1096–1108. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.06.045>
- Farzaneh-Gord, M. & Branch, S. (2011). Real and ideal gas thermodynamic analysis of single reservoir filling process of natural gas vehicle cylinders. *J Theor Appl Mech*, 41(12), 21–36.
- Fernandez, M., Ramirez, M., Perez, R. M., Gomez, J. M. & Cantero, D. (2013). Hydrogen sulfide removal from biogas by anoxic biotrickling filter packed with pall rings. *Chem Eng J*, 456–463. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.04.020>
- Gomes, V. G. & Yee, K. W. K. (2002). Pressure swing adsorption for carbon dioxide sequestration from exhaust gases. *Sep Purif Technol*, 28, 161–171. [http://dx.doi.org/10.1016/S1383-5866\(02\)00064-3](http://dx.doi.org/10.1016/S1383-5866(02)00064-3).
- Golimowski, W., Krzaczek, P., Marcinkowski, D., Gracz, W. & Wałowski, G. (2019). Impact of Biogas and Waste Fats Methyl Esters on NO, NO₂, CO, and PM Emission by Dual Fuel Diesel Engine. *Sustainability*, 11, 1799. <https://doi.org/10.3390/su11061799>
- Hagos, F. Y., Aziz, A. R. A. & Sulaiman, S. A. (2014). Trends of Syngas as a Fuel in Internal Combustion Engines. *Advances in Mechanical Engineering*, 6, <https://doi.org/10.1155/2014/401587>
- Hagos, F. Y., Aziz, A. R. A. & Sulaiman, S. A. (2014a). Syngas (H₂/CO) in a spark-ignition directinjection engine. Part 1: combustion, performance and emissions comparison with CNG. *Int J Hydrog Energy*, 39, 17884–17895. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.08.141>
- Hagos, F., Aziz, A. A. R., Sulaiman, S., Firmansyah, & Mamat, R. (2017). Effect of fuel injection timing of hydrogen rich syngas augmented with methane in direct-injection spark-ignition engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42 (37), 23846–23855. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.03.091>
- Hagos, F., Aziz, A. A. R., Sulaiman, S. A. & Mahgoub, K. M.(2016). Low and Medium Calorific Value Gasification Gas Combustion in IC Engines. *In Developments in Combustion Technology IntechOpen*. <https://doi.org/10.5772/64459>
- Hayes, T. D., Issacson, H. R., Pfeffer, J. T. & Liu, Y. M.(1990). In situ methane enrichment in anaerobic digestion. *Biotechnol Bioeng*, 35(1), 73–86. DOI: 10.1002/bit.260350111

- Hernández, N. M. & Villanueva, E. P.(2018). Production, Purification and Utilization of Biogas as Fuel For Internal Combustion Engine. AIP Conference Proceedings 1941, 020009, *Engineering International Conference*, 1–11. <https://doi.org/10.1063/1.5028067>
- Hernández, J. J., Lapuerta, M. & Barba, J. (2015). Effect of partial replacement of diesel or biodiesel with gas from biomass gasification in a diesel engine. *Energy*, 89, 148-157. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.07.050>.
- Hilaire, F., Basset, E., Bayard, R., Gallardo, M., Thiebaut, D. & Vial, J. (2017). Comprehensive two-dimensional gas chromatography for biogas and biomethane analysis. *Journal of Chromatography A*. 1524 (17), 222–232 <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2017.09.071>.
- Hinton, N. & Stone, R. (2014). Laminar burning velocity measurements of methane and carbon dioxide mixtures (biogas) over wide ranging temperatures and pressures. *Fuel*, 116, 743–750. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.08.069>
- Hosseini, S.E., & Wahid, M. (2014). Development of Biogas Combustion in Combined Heat and Power Generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 40, 868–875. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.204>
- Ilbas, M. & Karyeyen, S. (2015). A numerical study on combustion behaviours of hydrogen-enriched low calorific value coal gases. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(44), 15218–15226. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.04.141>
- Jena, S. P. & Acharya, S. K. (2019). Investigation on influence of thermal barrier coating on diesel engine performance and emissions in dual–fuel mode using upgraded biogas. *Sustain Environ Res*, 29 (24). <https://doi.org/10.1186/s42834-019-0025-4>
- Jeong, C., Kim, T., Lee, K., Song, S. & Chun, K.M. (2009). Generating efficiency and emissions of a spark–ignition gas engine generator fuelled with biogas–hydrogen blends, *International Journal of Hydrogen Energy*, 34(23), 9620–9627, ISSN 0360-3199, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.09.099>.
- Ji, C., Su, T., Wang, S., Zhang, B., Yu, M. & Cong, X. (2016). Effect of hydrogen addition on combustion and emissions performance of a gasoline rotary engine at part load and stoichiometric conditions. *Energy Conversion and Management*, 121, 272–280. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.05.040>
- Jung, C.J., Park, J. & Song, S. (2015). Performance and NOx emissions of a biogas–fueled turbocharged internal combustion engine, *Energy*, 86, 186–195. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.03.122>
- Kadam, R. & Panwar, N. L. (2017). Recent advancement in biogas enrichment and its applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73, 892–903. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.167>

- Kan, X., Zhou, D., Yang, W. M., Zhai, X. & Wang, C. (2018). An investigation on utilization of biogas and syngas produced from biomass waste in premixed spark ignition engine. *Applied Energy*, 212, 210–222. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.12.037>
- Kapdi, S.S., Vijay, V.K., Rajesh, S.K. & Prasad, R. (2005). Biogas scrubbing, compression and storage: perspective and prospectus in Indian Context. *Renew Energy*, 30(8), 1195–1202. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2004.09.012>
- Karim, G. (2003). Hydrogen as a spark ignition engine fuel. *Int J Hydrogen Energy*, 28(5), 569–577. [https://doi.org/10.1016/S0360-3199\(02\)00150-7](https://doi.org/10.1016/S0360-3199(02)00150-7)
- Khatrri, N. & Khatrri, K. K. (2020). Hydrogen enrichment on diesel engine with biogas in dual fuel mode. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45 (11), 7128–7140. ISSN 0360–3199, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.12.167>.
- Kim, Y., Kawahara, N., Tsuboi, K. & Tomita, E. (2016). Combustion characteristics and NOX emissions of biogas fuels with various CO₂ contents in a micro co-generation spark-ignition engine. *Applied Energy*, 182, 539–547. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.08.152>
- Kirti, M., Gosai, D. C. & Shah, A.V. (2017). Application of biogas in I.C engine: A review. *International Journal of Advance Research in Science and Engineering*, 6 (01), 122–127.
- Korakianitis, T., Namasivayam, A. M. & Crookes, R.J. (2011). Natural-gas fueled spark-ignition (SI) and compression-ignition (CI) engine performance and emissions. *Progress in Energy and Combustion Science*, 37(1), 89–112, <https://doi.org/10.1016/j.peccs.2010.04.002>
- Kovacs, V. B. & Torok, A. (2010). Investigation on transport related biogas utilization. *Transport*, 25(1), 77–80, DOI: 10.3846/transport.2010.10
- Kukoyi, T., Muzenda, E. & Mashamba, A. (2015). Biomethane and Bioethanol as alternative transport fuels, *7th International Conference on Latest Trends in Engineering & Technology (ICLTET'2015)* Nov. 26–27, 2015 Irene, Pretoria (South Africa). <http://dx.doi.org/10.15242/IIIE.E1115054>
- Lee, J.A. (2010). Study on Performance and Emissions of a 4–stroke IC Engine Operating on Landfill Gas with the Addition of H₂, CO and Syngas. *New York: Columbia University*.
- Lee, K., Kim, T., Cha, H., Song, S., & Chun, K.M. (2010a). Generating efficiency and NOx emissions of a gas engine generator fueled with a biogas–hydrogen blend and using an exhaust gas recirculation system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(11), 5723–30. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.03.076>
- Lee, S., Park, S., Kim, C., Kim, Y., Kim & Park, C. (2014). Comparative study on EGR and lean burn strategies employed in an SI engine fueled by low calorific gas. *Applied Energy*, 129, 10–16. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.04.082>

- Li, W., Dai, Y., Ma, L., Hao H., Lu, H., Albinson, R. & Li, Z. (2015). Oil-saving pathways until 2030 for road freight transportation in China based on a cost–optimization model. *Energy*, 86, 369–84. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.04.033>
- Li, J., Huang, H., Huhetaoli, Osaka, Y., Bai, Y., Kobayashi, N. & Chen, Y. (2017). Combustion and Heat Release Characteristics of Biogas under Hydrogen–and Oxygen-Enriched Condition. *Energies*, 10, 1200. <https://doi.org/10.3390/en10081200>
- Lilik, G., Zhang, H. & Herreros J. (2010). Hydrogen assisted diesel combustion. *Int J Hydrogen Energy*, 35, 4382–4398. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.01.105>.
- Lim C, Kim D, Song C, Kim J, Han J & Cha JS. (2015). Performance and emission characteristics of a vehicle fueled with enriched biogas and natural gases. *Appl Energy*, 139, 17–29. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.10.084>.
- Lindeboom, R., Fermoso, F., Weijma, J., Zagt, K., Van & Lier, J. (2011). Autogenerative high pressure digestion: anaerobic digestion and biogas upgrading in a single step reactor system. *Water Sci Technol*, 64(3), 647–53.
- Maizonnasse, M., Plante, J.-S., Oh, D. & Laflamme, C. (2013). Investigation of the degradation of a low–cost untreated biogas engine using preheated biogas with phase separation for electric power generation. *Renewable Energy*, 55, 501–513. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.01.006>.
- Makareviciene, V., Sendzikiene, E., Pukalskas, S., Rimkus, A. & Vegneris, R. (2013). Performance and emission characteristics of biogas used in diesel engine operation. *Energy Conversion and Management*, 75, 224–233. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.06.012>
- Mamilla, V., Gopinath, V., Rao, C. V. & Rao, L. (2011). Performance and emission characteristics of 4 stroke petrol engine fueled with biogas / l.p.g blends. *International Journal of Advanced Engineering Technology*. II (I), 209–213.
- Marculescu, C., Cenusă, V. & Alexe, F. (2016). Analysis of biomass and waste gasification lean syngases combustion for power generation using spark ignition engines, *Waste Management*, 47, Part A, 133–140, ISSN 0956-053X, <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.06.043>
- Martínez, J., Mahkamov, K., Andrade, R. & Lora, E. (2012). Syngas production in downdraft biomass gasifiers and its application using internal combustion engines. *Renewable Energy*, 38(1), 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.07.035>
- Montoya, J. P. G., Arrieta, A. A. A. & Lopez, J. F. Z. (2015). Spark ignition engine performance and emissions in a high compression engine using biogas and methane mixtures without knock occurrence. *Therm. Sci.* 19, 1919–1930.

- Molino, A., Migliori, M., Ding, Y., Bikson, B., Giordano, G. & Braccio, G. (2013). Biogas upgrading via membrane process: modelling of pilot plant scale and the end uses for the grid injection. *Fuel*, 107, 585–592. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2012.10.058>.
- Mustafi, N. N., Raine, R. R. & Verhelst, S. (2013). Combustion and emissions characteristics of a dual fuel engine operated on alternative gaseous fuels. *Fuel*, 109, 669–678. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2013.03.007>.
- Nadaleti, W. & Przybyla, G. (2018). Emissions and performance of a spark-ignition gas engine generator operating with hydrogen-rich syngas, methane and biogas blends for application in Southern Brazil rice industries. *Energy*, 154, 38–51. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.04.046>
- Nataraj, K.M., Banapurmath, N., Manavendra, G. & Yaliwal, V. (2016). Development of cooling and cleaning systems for enhanced gas quality for 3.7 kW gasifier-engine integrated system. *International Journal of Engineering, Science and Technology*, 8, (1), 43–56. DOI: <http://dx.doi.org/10.4314/ijest.v8i1.4>
- Nikpey, H., Assadi, M., Breuhaus, P. & Mørkved, P.T. (2014). Experimental evaluation and ANN modeling of a recuperative micro gas turbine burning mixtures of natural gas and biogas, *Applied Energy*, 117, 30–41, ISSN 0306–2619, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.11.074>.
- Nizar, J., Takayuki, T. & Noboru, N. (2008). The Study on the Effect of Biogas Addition on the Diesel Tractor Engine for the Development of a Biogas Controller, *IFAC Proceedings Volumes*, 41 (2), 9585–9590, ISSN 1474–6670, ISBN 9783902661005, <https://doi.org/10.3182/20080706-5-KR-1001.01621>.
- Park, C., Park, S., Lee, Y., Kim, C., Lee, S. & Moriyoshi, Y. (2011). Performance and emission characteristics of a SI engine fueled by low calorific biogas blended with hydrogen. *Int J Hydrog Energy*, 36(16), 10080–10088. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.05.018>
- Park, S.-H., Lee, K.-M. & Hwang, C.-H. (2011a). Effects of hydrogen addition on soot formation and oxidation in laminar premixed C₂H₂/air flames. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36 (15), 9304–9311. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.05.031>
- Park, C., Park, S., Kim, C. & Lee, S. (2012). Effects of EGR on performance of engines with spark gap projection and fueled by biogas-hydrogen blends. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37 (19), 14640–14648. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.07.080>
- Patterson, T., Esteves, S., Dinsdale, R. & Guwy, A. (2011). An evaluation of the policy and techno-economic factors affecting the potential for biogas upgrading for transport fuel use in the UK. *Energy Policy*, 39, 1806–16. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2011.01.017>.
- Persson, T. & Baxter, D. (2014). Task 37 country overview-Energy from biogas, *IEA Bioenergy*.

- Piaptmanomai, S., Kaewluan, S. & Vitidsant T. (2009). Economic assessment of biogas-to-electricity generation system with H₂S removal by activated carbon in small pig farms. *Applied Energy*, 86(5), 669–674, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2008.07.007>
- Pizzuti, L., Martins, C. A. & Lacava, P. T. (2016). Laminar burning velocity and flammability limits in biogas: A literature review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 856-865, ISSN 1364–0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.011>.
- Poeschl, M., Ward, S. & Owende, P. (2010). Prospects for expanded utilization of biogas in Germany. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14 (7), 1782–1797, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.04.010>
- Porpatham, E., Ramesh, A. & Nagalingam, B. (2007). Effect of hydrogen addition on the performance of a biogas fuelled spark ignition engine. *Int J Hydrogen Energy*, 32(12), 2057–2065. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2006.09.001>
- Porpatham, E., Ramesh, A. & Nagalingam, B. (2008). Investigation on the effect of concentration of methane in biogas when used as a fuel for a spark ignition engine. *Fuel*, 87(8–9), 1651–1659, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2007.08.014>
- Porpatham, E., Ramesh, A. & Nagalingam, B. (2012). Effect of compression ratio on the performance and combustion of a biogas fuelled spark ignition engine. *Energy Convers Manage*, 95(1), 247–256. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.10.059>
- Porpatham, E., Ramesh, A. & Nagalingam, B. (2017). Experimental studies on the effects of enhancing the concentration of oxygen in the inducted charge of a biogas fuelled spark ignition engine. *Energy*, 142, 303–312. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.10.025>
- Prajapati, A. K., Randa, R. & Parmar, N. (2015). Experimental study on utilization of biogas in IC engine. *International Journal of Engineering Sciences & Research Technology*, 4(8), 827–835.
- Rahbari, H. R. (2014). Effects of natural gas compositions on CNG fast filling process for buffer storage system. *Oil Gas Sci Technol–Revue d'IFP Energies Nouvelles*, 69, 319–30. <http://dx.doi.org/10.2516/ogst/2012010>.
- Rahman, K. & Ramesh, A. (2017). Effect of reducing the methane concentration on the combustion and performance of a biogas diesel predominantly premixed charge compression ignition engine, *Fuel*, 206, 117–132, ISSN 0016-2361, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.05.100>.
- Rajkumari, K. & Govindarajan, P. (2010). Experimental investigation of oxygen enriched air intake on combustion parameters of a single cylinder diesel engine. *Int J Eng Sci Technol*, 2(8), 3621–3627, ISSN: 0975–5462

- Rakopoulos, C. D., Michos, C. N. & Giakoumis, E. G. (2008). Studying the effects of hydrogen addition on the second-law balance of a biogas-fuelled spark ignition engine by use of a quasidimensional multi-zone combustion model. *Proc Inst Mech Eng, J Autom Eng*, 222(11), 2249–2268.
- Rakopoulos, C. D. & Kyritsis, D.C. (2006). Hydrogen enrichment effects on the second law analysis of natural and landfill gas combustion in engine cylinders. *Int J Hydrog Energy*, 31(10), 1384–1393. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2005.11.002>
- Rakopoulos, C. D. & Michos, C.N. (2009). Generation of combustion irreversibilities in a spark ignition engine under biogas-hydrogen mixtures fueling. *Int J Hydrogen Energy*, 34, 4422–4437. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.02.087>
- Ravi, K., Mathew, S., Bhasker, P. & Porpatham, E. (2016). Gaseous alternative fuels for CI engines—a technical review. *International Journal of Pharmacy and Technology*, 8(4), 5257–5268.
- Ray, N., Mohanty, M. K. & Mohanty, R. (2013). A Study on Application of Biogas as fuel in Compression Ignition Engines. *International Journal of Innovations in Engineering and Technology*, 3(1), 239–245. ISSN: 2319–1058.
- Razbani, O., Mirzamohammad, N. & Assadi, M. (2011). Literature review and road map for using biogas in internal combustion engines. *Third International Conference on Applied Energy*, 16–18.
- Roy, M.M., Tomita E., Kawahara N., Harada Y. & Sakane A. (2009). Performance and emission comparison of a supercharged dual-fuel engine fueled by producer gases with varying hydrogen content. *Hydrog Energy*, 34(18), 7811–7822. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.07.056>
- Sarker, S., Lamb, J., Hjelme, D. & Lien, K. (2018). Overview of recent progress towards in-situ biogas upgradation techniques. *Fuel*, 226, 686–697. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.04.021>
- Shah, D. R., Nagarsheth, H. J. & Acharya, P. (2016). Purification of Biogas using Chemical Scrubbing and Application of Purified Biogas as Fuel for Automotive Engines. *Research Journal of Recent Sciences. International Science Community Association*, 5, 1–7.
- Shigarkanthi, V.M., Porpatham, E. & Ramesh, A. (2005). Experimental investigation and modeling of cycle by cycle variations in a gas fuelled SI engine, *SAE Technical Paper*.
- Shrestha, B., & Karim, G.A. (1999). Hydrogen as an additive to methane for spark ignition engine applications. *Int J Hydrogen Energy*, 24(6), [https://doi.org/10.1016/S0360-3199\(98\)00103-7](https://doi.org/10.1016/S0360-3199(98)00103-7)
- Singh, D., Devnani, G. L. & Pal, D. (2016). Biomethane an efficient source of production of CNG and formaldehyde. *Int J Sci Eng Appl Sci*, 2(1), 466–470.
- Sivabalakrishnan, R. & Jegadheesan, C. (2014). Study of Knocking Effect in Compression Ignition Engine with Hydrogen as a Secondary Fuel. *Chin J Eng*, 2014, 1–8. <https://doi.org/10.1155/2014/102390>

- Subramanian, K. A., Mathad, V. C., Vijay, V. K. & Subbarao, P. M. V. (2013). Comparative evaluation of emission and fuel economy of an automotive spark ignition vehicle fuelled with methane enriched biogas and CNG using chassis dynamometer. *Appl Energy*, 105, 17–29. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.12.011>.
- Sun, Q., Li, H., Yan, J., Liu, L., Yu, Z. & Yu, X. (2015). Selection of appropriate biogas upgrading technology—a review of biogas cleaning, upgrading and utilisation. *Renew Sustain Energy Rev*, 51, 521–532. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.06.029>
- Talibi, M., Hellier, P., Balachandran, R. & Ladommatos, N. (2014). Effect of hydrogen-diesel fuel co-combustion on exhaust emissions with verification using an inecylinder gas sampling technique. *Int J Hydrogen Energy*, 39, 15088–15102. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.07.039>.
- Thamsiriroj, T., Smyth, H. & Murphy, J.D. (2011). A roadmap for the introduction of gaseous transport fuel: a case study for renewable natural gas in Ireland. *Renew Sustain Energy Rev*, 15, 4642–4651. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.088>.
- Tock, L., Gassner, M. & Maréchal, F. (2010). Thermochemical production of liquid fuels from biomass: thermo-economic modeling, process design and process integration analysis. *Biomass Bioenerg*, 34(12), 1838–1854. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.07.018>
- Tricase, C. & Lombardi, M. (2009). State of the art and prospects of Italian biogas production from animal sewage: technical-economic considerations. *Renew Energy*, 34, 477–485. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2008.06.013>.
- Ullah-Khan, Imran, Hafiz-Dzarfan Othman, Mohd, Hashim, Haslenda, Matsuura, Takeshi, Ismail, A.F., Rezaei-Dasht Arzhandi, M. & Wan Azelee, I. (2017). Biogas as a renewable energy fuel - A review of biogas upgrading, utilisation and storage. *Energy Conversion and Management*, 150, 277–294. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.08.035>
- Uusitalo, V., Soukka, R., Horttanainen, M., Niskanen, A. & Havukainen, J. (2013). Economics and Greenhouse Gas Balance of Biogas use systems in the Finnish Transportation Sector. *Renewable Energy*, 51, 132–140. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.09.002>
- Verma, S., Das, L. M. & Kaushik, S.C. (2017). Effects of varying composition of biogas on performance and emission characteristics of compression ignition engine using exergy analysis. *Energy Conversion and Management*, 138, 346–359, ISSN 0196-8904, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.01.066>.
- Vijay, V., Kapoor, R., Trivedi, A. & Narale, P. (2015). Biogas upgrading and bottling technology for vehicular and cooking applications. *Manage Nat Resour Chang Environ*, 1, 135–153.
- Wagemakers, A. & Leermakers, C. (2012). Review on the Effects of Dual Fuel Operation, Using Diesel and Gaseous Fuels, on Emissions and Performance, *SAE Paper*, 2012. <https://doi.org/10.4271/2012-01-0869>

- Wang, J., Huang, Z., Fang, Y., Liu, B., Zeng, K., Miao, H. & Jiang, D. (2007). Combustion behaviors of a direct injection engine operating on various fractions of natural gas–hydrogen blends. *International Journal of Hydrogen Energy*, 32(15), 3555–3564. ISSN 0360–3199, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2007.03.011>.
- Wang, H., Zhao, X., Tong, L. & Yao, M. (2018). The effects of DI fuel properties on the combustion and emissions characteristics of RCCI combustion, *Fuel*, 227, 457–468, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.04.025>
- Weiland, P. (2010). Biogas production: current state and perspectives. *Appl Microbiol Biotechnol*, 85(4), 849–860. <http://dx.doi.org/10.1007/s00253-009-2246-7>.
- Yaliwal, V. S., Banapurmath, N. R., Gireesh, N. M., Hosmath, R. S., Donateo, T. & Tewari, P.G. (2016). Effect of nozzle and combustion chamber geometry on the performance of a diesel engine operated on dual fuel mode using renewable fuels, *Renewable Energy*, 93, 483–501, ISSN 0960-1481, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.03.020>.
- Yamasaki, Y., Kanno, M., Suzuki, Y. & Kaneko, S. (2013). Development of an engine control system using city gas and biogas fuel mixture. *Applied Energy*, 101, 465–474. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.06.013>
- Yan, F., Xu, L. & Wang, Y. (2017). Application of hydrogen enriched natural gas in spark ignition IC engines: From fundamental fuel properties to engine performances and emissions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82 (1), 1457–1488 <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.227>
- Yilmaz, I. & Gumus, M. (2017). Investigation of the effect of biogas on combustion and emissions of TBC diesel engine. *Fuel*, 188, 69–78. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.10.034>
- Yingjian, L., Qiu, Q., Xiangzhu, H. & Jiezhi, L. (2014). Energy balance and efficiency analysis for power generation in internal combustion engine sets using biogas. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 6, 25–33. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2014.01.003>
- Yousef, A. M. I., Eldrainy, Y. A., El-Maghlany, W. M. & Attia, A. (2016). Upgrading biogas by a low-temperature CO₂ removal technique, *Alexandria Engineering Journal*, 55(2), 1143–1150, ISSN 1110–0168, <https://doi.org/10.1016/j.aej.2016.03.026>.
- Xin, Z., Jian, X., Shizhuo, Z., Xiaosen, H. & Jianhua, L. (2013). The experimental study on cyclic variation in a spark ignited engine fueled with biogas and hydrogen blends. *Int J Hydrog Energy*, 38, 11164–11168. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.01.097>
- Zhao, H., Stone, R. & Zhou, L. (2010). Analysis of the particulate emissions and combustion performance of a direct injection spark ignition engine using hydrogen and gasoline mixtures. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35 (10), 4676–4686. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.02.087>

Zhen, H., Leung, C. W., Cheung, C. S. & Huang, Z. (2016). Combustion characteristic and heating performance of stoichiometric biogas–hydrogen–air flame. *Int. J. Heat Mass Transf*, 92, 807–814. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.09.040>

Zhunqing, H. & Xin, Z. (2012). Experimental study on performance and emissions of engine fueled with lower heat value gas–hydrogen mixtures, *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(1), 1080–1083, ISSN 0360–3199, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.02.088>.