



MASTER EN AUTOMOCIÓN

ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE MÁSTER

BIOGÁS COMO COMBUSTIBLE ALTERNATIVO EN AUTOMOCIÓN

Autor: D. José Ángel Vázquez Díaz
Tutor: D. Francisco Vicente Tinaut Fluixá

Valladolid, Septiembre de 2013

Escuela Ingenierías Industriales

Depto. Ing^a Energética y Fluidomecánica

Paseo del Cauce s/n

47011 Valladolid
(España)



Fundación Cidaut

Parque Tecnológico de Boecillo, 209

47151 Boecillo (Valladolid)

España



BIOGÁS COMO COMBUSTIBLE ALTERNATIVO EN AUTOMOCIÓN

Actualmente muchas investigaciones se centran en la búsqueda de combustibles alternativos para cumplir con las necesidades de transporte y reducir el impacto ambiental en Automoción. El uso de combustibles gaseosos en el sector del transporte es una opción prometedora además de promover la diversificación energética.

Los combustibles se clasifican en función de las propiedades de los mismos, centrándose este trabajo en el estudio del biogás, sus aplicaciones, las infraestructuras de almacenamiento y su transporte a través de la red de gas natural. Posteriormente se describen los diferentes tipos de vehículos de gas natural comprimido, en función de su construcción, tipos de recarga, seguridad y emisiones. También se describen las estaciones de servicio.

Se ha realizado un análisis para los motores de encendido provocado (MEP) y encendido por compresión (MEC) alimentados con biogás de los siguientes parámetros: presión media efectiva (BMEP), la eficiencia térmica (BTE), temperatura de los gases de escape, las variaciones en el grado de avance del motor, sincronización de la chispa y la introducción de hidrógeno en la mezcla. Finalmente, se han estudiado también las emisiones de óxidos de nitrógeno, monóxido de carbono, hidrocarburos no quemados y partículas en diferentes pruebas para motores MEP y MEC.

BIOGAS AS AN ALTERNATIVE FUEL IN AUTOMOTIVE APPLICATIONS

ABSTRACT

Considerable research is currently being devoted to seeking alternative fuels to comply with transportation needs while reducing the environmental impact of this sector. The use of gaseous fuels in the transport sector appears to be a promising and performing option, in addition to promoting energy diversification.

Firstly the fuels were rated and reported the main properties of the same, focusing the study on biogas, applications and storage infrastructure and its transport through the natural gas network. After that, there has been a description of the types of compressed natural gas vehicles showing the different types of construction, kinds of refueling safety and emissions. The gas stations were also described.

The brake mean effective pressure (BMEP), and thermal efficiency (bte), temperature of the exhaust gas, variations in the degree of progress of the motor, spark timing, the introduction of hydrogen in the mixture were analyzed for spark ignition engines and compression ignition engines consuming biogas. Finally, the emissions of nitrogen oxides, carbon monoxide, unburned hydrocarbons and particulate matter have been studied also in different tests for SI and CI engines.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, me gustaría dar las gracias a mis padres. Sin su ayuda no habría sido capaz de terminar este Máster. Por su comprensión y apoyo en todo momento a pesar de todas las dificultades presentes.

Quisiera agradecer también la ayuda prestada por mi Tutor y sus Colaboradores, facilitando la consulta y documentación sin la cual no se podría haber realizado con éxito este Trabajo Fin de Máster.

INDICE

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	ANTECEDENTES.....	1
1.2	OBJETIVOS	2
1.3	PLANTEAMIENTO DEL TRABAJO.....	2
2	COMBUSTIBLES EN AUTOMOCIÓN	3
2.1	INTRODUCCIÓN	3
2.2	CLASIFICACIÓN DE LOS COMBUSTIBLES	3
2.3	PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DE LOS COMBUSTIBLES PARA AUTOMOCIÓN.....	7
2.3.1	<i>Propiedades físicas, químicas y fisicoquímicas de los sólidos</i>	<i>7</i>
2.3.2	<i>Propiedades fisicoquímicas de los líquidos.....</i>	<i>7</i>
2.3.3	<i>Propiedades fisicoquímicas de los gases.</i>	<i>10</i>
2.4	PROPIEDADES TERMOQUÍMICAS DE LOS COMBUSTIBLES PARA AUTOMOCIÓN.....	11
2.5	COMBUSTIBLES DE ORIGEN RENOVABLE	12
2.5.1	<i>Obtención de combustibles renovables a partir de biomasa.....</i>	<i>12</i>
2.5.2	<i>Combustibles líquidos de origen renovable</i>	<i>15</i>
2.5.3	<i>Combustibles gaseosos de origen renovable</i>	<i>15</i>
2.5.4	<i>Resumen métodos de producción y parámetros de biocombustibles</i>	<i>16</i>
2.5.5	<i>Combustión de biocombustibles gaseosos en MCIA</i>	<i>16</i>
3	EL BIOGÁS COMO COMBUSTIBLE ALTERNATIVO PARA AUTOMOCIÓN	21
3.1	INTRODUCCIÓN	21
3.2	FERMENTACIÓN ANAEROBIA.....	22
3.3	APLICACIONES DEL BIOGÁS.....	23
3.3.1	<i>Combustión directa del biogás</i>	<i>24</i>
3.3.2	<i>Generación de calor y electricidad con biogás. Cogeneración</i>	<i>24</i>
3.3.2.1	<i>Motor de Gas-Otto (MEP).....</i>	<i>25</i>
3.3.2.2	<i>Motor de Gas-Diesel (MEC)</i>	<i>25</i>
3.3.2.3	<i>Motor Stirling</i>	<i>26</i>
3.3.3	<i>Microturbinas de biogás</i>	<i>26</i>
3.3.4	<i>Pilas de combustible.....</i>	<i>26</i>
3.4	BIOMETANO OBTENIDO A PARTIR DE LA MEJORA DEL BIOGÁS.....	27
3.4.1	<i>Inyección del biometano en la red de distribución de gas natural.....</i>	<i>27</i>
3.4.2	<i>Biogás como combustible para vehículos.....</i>	<i>28</i>
3.5	INFRAESTRUCTURAS PARA LA DISTRIBUCIÓN DEL BIOMETANO.....	28
4	COMPORTAMIENTO DE LOS VEHÍCULOS CON BIOGÁS	31
4.1	INTRODUCCIÓN	31
4.2	PARÁMETROS CONSTRUCTIVOS EN VEHÍCULOS CON BIOGÁS	32
4.2.1	<i>Componentes de un vehículo de GNC o biogás</i>	<i>32</i>
4.2.2	<i>Dispositivos para la formación de mezcla con combustibles gaseosos.</i>	<i>33</i>

4.2.3	<i>Tipos de motores en la combustión con combustibles gaseosos.</i>	34
4.2.3.1	Motores de encendido provocado (MEP)	34
4.2.3.2	Motores de encendido por compresión (MEC)	35
4.3	REPOSTAJE DE LOS VEHÍCULOS ALIMENTADOS CON BIOGÁS	35
4.3.1	<i>Sistemas de recarga de vehículos alimentados a gas.</i>	36
4.3.1.1	Sistemas de recarga lenta	36
4.3.1.2	Sistemas de recarga rápida	36
4.3.1.3	Componentes de un sistema de recarga	37
4.3.1.4	Seguridad en los sistemas de recarga	37
4.3.2	<i>Seguridad en los vehículos a gas.</i>	38
4.4	PRESTACIONES DE VEHÍCULOS CON MOTORES DE GAS NATURAL COMPRIMIDO (CNG)	38
4.4.1	<i>Comparación de la potencia de los vehículos con CNG.</i>	38
4.4.1.1	Inyección directa (multipunto)	38
4.4.1.2	Inyección indirecta (monopunto)	39
4.4.2	<i>Comparación del nivel de ruido de los vehículos con CNG.</i>	39
4.4.3	<i>Comparación del consumo de combustible de los vehículos con CNG.</i>	39
4.4.4	<i>Comparación de las emisiones contaminantes de los vehículos con CNG.</i>	39
4.4.5	<i>Comparativa de emisiones de escape vehículos comerciales a gas.</i>	40
4.4.6	<i>Resumen de los comportamientos de los vehículos con CNG.</i>	42
4.4.6.1	Ventajas del CNG respecto de los combustibles tradicionales	42
4.4.6.2	Inconvenientes del CNG respecto de los combustibles tradicionales	42
5	PRESTACIONES Y EMISIONES CONTAMINANTES DE LOS MOTORES CON BIOGÁS	43
5.1	INTRODUCCIÓN	43
5.2	PRESTACIONES ESPECÍFICAS EN MOTORES CON BIOGÁS EN MODO MEP	43
5.3	EMISIONES CONTAMINANTES DE LOS MOTORES MEP CON BIOGÁS	49
5.3.1	Óxidos de Nitrógeno	50
5.3.2	Monóxido de carbono	52
5.3.3	Hidrocarburos sin quemar	52
5.4	PRESTACIONES ESPECÍFICAS Y EMISIONES DE MEP CON BIOGÁS EN MODO EC	52
5.5	EMISIONES CONTAMINANTES DE LOS MOTORES MEC CON BIOGÁS	55
5.5.1	Óxidos de Nitrógeno	56
5.5.2	Monóxido de Carbono	56
5.5.3	Hidrocarburos sin quemar	56
5.5.4	Emisiones de Partículas	57
6	CONCLUSIONES	58
6.1	CONCLUSIONES DEL TRABAJO	58
6.2	SUGERENCIAS PARA TRABAJOS FUTUROS	59
7	BIBLIOGRAFÍA	60
8	ANEXOS	62

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

El aumento de la demanda mundial de petróleo y la disminución en la producción que claramente se producirá en las próximas décadas, promueven el desarrollo de nuevas fuentes de energías primarias, ya que hasta ahora el consumo de energía es principalmente suministrado por los combustibles fósiles, que emiten gases de efecto invernadero medioambientalmente nocivos. Todo ello, tanto la falta de combustibles fósiles como el alto nivel de las emisiones de gases contaminantes, hacen que se consideren otras fuentes de energía primaria, como la energía solar, eólica, hidráulica, geotérmica y energía procedente de la biomasa.

La industria del Automóvil presenta una serie de características que la diferencian de otras industrias, como su producción masiva, además de ser un sector muy tecnificado ya que cada vez los vehículos presentan más avances tecnológicos a la par de un mayor uso de la instrumentación a bordo. Es además una industria con gran competencia por el elevado número de fabricantes de vehículos dónde la calidad se torna el elemento diferenciador por parte del consumidor, aunque también debe cumplir una normativa cada vez más restrictiva a nivel de emisiones contaminantes. (Euro V y Euro VI)

Por otra parte debido a que los vehículos actuales son propulsados en su gran mayoría por motores de combustión interna alternativos (MCIA), alimentados por combustibles fósiles, generalmente gasolina o diesel (productos del refinado del petróleo y de recurso finito), se demanda cada vez más alternativas a la movilidad con fuentes de energía renovable, y dentro de estas, la biomasa tiene un papel crucial ya que en la actualidad representa el 45% de la producción con energías renovables en España.

La biomasa presenta la dificultad de que necesita de procesos de transformación para ser utilizada en Automoción y sus costes asociados no siempre lo hacen viable. La utilización de la biomasa como combustible en vehículos sólo puede ser válida después de una serie de procesos que la transformen en combustibles líquidos o gaseosos. Por eso va encaminada a ser usada como una fuente de energía que no requiera grandes modificaciones de los motores de combustión o bien a ser tratada para la obtención de diferentes combustibles que puedan alimentar la variedad de motores que se usan para el transporte.

Actualmente el biometano es el sustituto como combustible renovable del Gas Natural (GN), por eso donde se encuentre una aplicación que requiera GN puede ser introducido el biometano. Ambos no tienen gran presencia en el mercado de vehículos ligeros, aunque los principales fabricantes tienen algún modelo a la venta. En vehículos pesados y en el transporte público se pueden encontrar motores alimentados con GN, generalmente son flotas de vehículos que tienen accesibilidad a la recarga del combustible gaseoso siendo este entorno al 50% más económico además de tener menores costes económicos asociados al mantenimiento.

El biogás enriquecido o biometano es un combustible alternativo de origen renovable que puede ser sustituto de gasolinas o gasóleos total o parcialmente, ya que depende de las características configuración y prestaciones requeridas al motor. En la actualidad existen vehículos nuevos a la venta que pueden consumir GN o bien MCIA que pueden adaptarse a ser alimentados con GN, en ambos casos los costes asociados no son elevados.

El biometano presenta una serie de ventajas medioambientales importantes como las emisiones de gases efecto invernadero en torno a un 25% menores con respecto a la gasolina. No contienen metales pesados como el plomo, tampoco anillos aromáticos como el benceno, por lo que es más sencillo cumplir con la normativa Euro V de emisiones.

En algunos países de la UE como Alemania, bajo restrictivas normas de calidad, se inyecta biometano a la red de distribución de Gas Natural, evitando así la emisión de contaminantes a la atmósfera, junto con una menor importación de combustibles fósiles. Otra consideración a tener en cuenta es la

eliminación de metano de la atmósfera procedente de vertederos o granjas (degradación anaerobia), ya que es un gas con un efecto invernadero 23 veces superior al del dióxido de carbono (CO₂)

En este Trabajo Fin de Máster se ha querido dar un enfoque general de la situación actual del biogás como combustible alternativo con fines de propulsión de vehículos con motores de combustión interna alternativos.

1.2 Objetivos

Los principales objetivos de este Trabajo Fin de Máster, son:

- Clasificar los combustibles
- Identificar las propiedades fisicoquímicas y termoquímicas de los combustibles
- Describir las aplicaciones e infraestructuras asociadas al biogás
- Detallar los vehículos propulsados con biogás así como sus prestaciones, seguridad, repostaje y emisiones
- Analizar las prestaciones y emisiones referidas a motores alimentados con biogás

1.3 Planteamiento del trabajo

Se ha planteado el trabajo basado en la búsqueda de información bibliográfica, con el fin de dar una visión general a la aplicación del biogás como combustible alternativo, en los motores de encendido provocado (MEP) y motores de encendido por compresión (MEC), valorando las prestaciones que puedan alcanzar los vehículos y sus niveles de emisiones contaminantes asociadas.

2 Combustibles en Automoción

Los combustibles usados en motores alternativos de combustión interna (MCIA) proceden en su mayoría de la industria del refino del petróleo y tradicionalmente su estado de agregación es líquido, así en los motores de encendido provocado (MEP) se utiliza gasolina y en los de encendido por compresión (MEC) es el gasóleo. Destacan por las ventajas de su facilidad para el almacenamiento, distribución, repostaje en los vehículos, autonomía y sistema de alimentación del motor, que junto con la densidad energética de este tipo de combustibles de origen fósil confieren ventajas como combustibles para automoción. [Lapuerta, 2011]

A pesar de las ventajas de los combustibles tradicionales, poseen una serie de inconvenientes como las limitaciones impuestas por las normativas de emisiones donde no solo se han visto implicados los fabricantes de automóviles para mejorar los sistemas de combustión y postcombustión para que sean cada vez más limpios y eficaces sino que también la industria petrolera ha mejorado sus procesos y tecnologías para lograr unas emisiones menores y cumplir con las normativas. [Lapuerta, 2011].

Con la perspectiva puesta en el futuro, el hidrógeno es el vector energético principal entre la fuente de generación de energía y la propulsión, pero su implantación es lejana, mientras los biocombustibles que también están sometidos a una estricta limitación de calidad y sostenibilidad toman protagonismo.

2.1 Introducción

Los combustibles son sustancias capaces de reaccionar exotérmicamente con el oxígeno, transformando su energía asociada a su estructura molecular en energía térmica. La principal clasificación de los combustibles los divide en función de su estado de agregación: sólido, líquido y gaseoso. Debido a las exigencias derivadas de los MCIA tales como la velocidad de la mezcla y reacción, hacen inviables los combustibles sólidos como el carbón o la biomasa sin procesar químicamente, por ello se usan combustibles líquidos o gaseosos.

Los combustibles líquidos tienen las ventajas de su gran densidad energética (poder calorífico) que les asegura una gran autonomía y seguridad en el manejo. Por el contrario, este tipo de combustible requiere sistemas que faciliten la evaporación y la mezcla con el oxidante, porque la combustión tiene lugar en fase gaseosa. [Tinaut, 2011b]

Los combustibles gaseosos tienen la ventaja de su buena capacidad para mezclarse homogéneamente y quemarse con emisiones reducidas. La principal desventaja de los combustibles gaseosos es su elevado volumen específico que complica las operaciones de almacenamiento y reduce su autonomía. [Tinaut, 2011b].

2.2 Clasificación de los combustibles

Se muestra una clasificación de los combustibles que se utilizan en la industria en la Ilustración 1

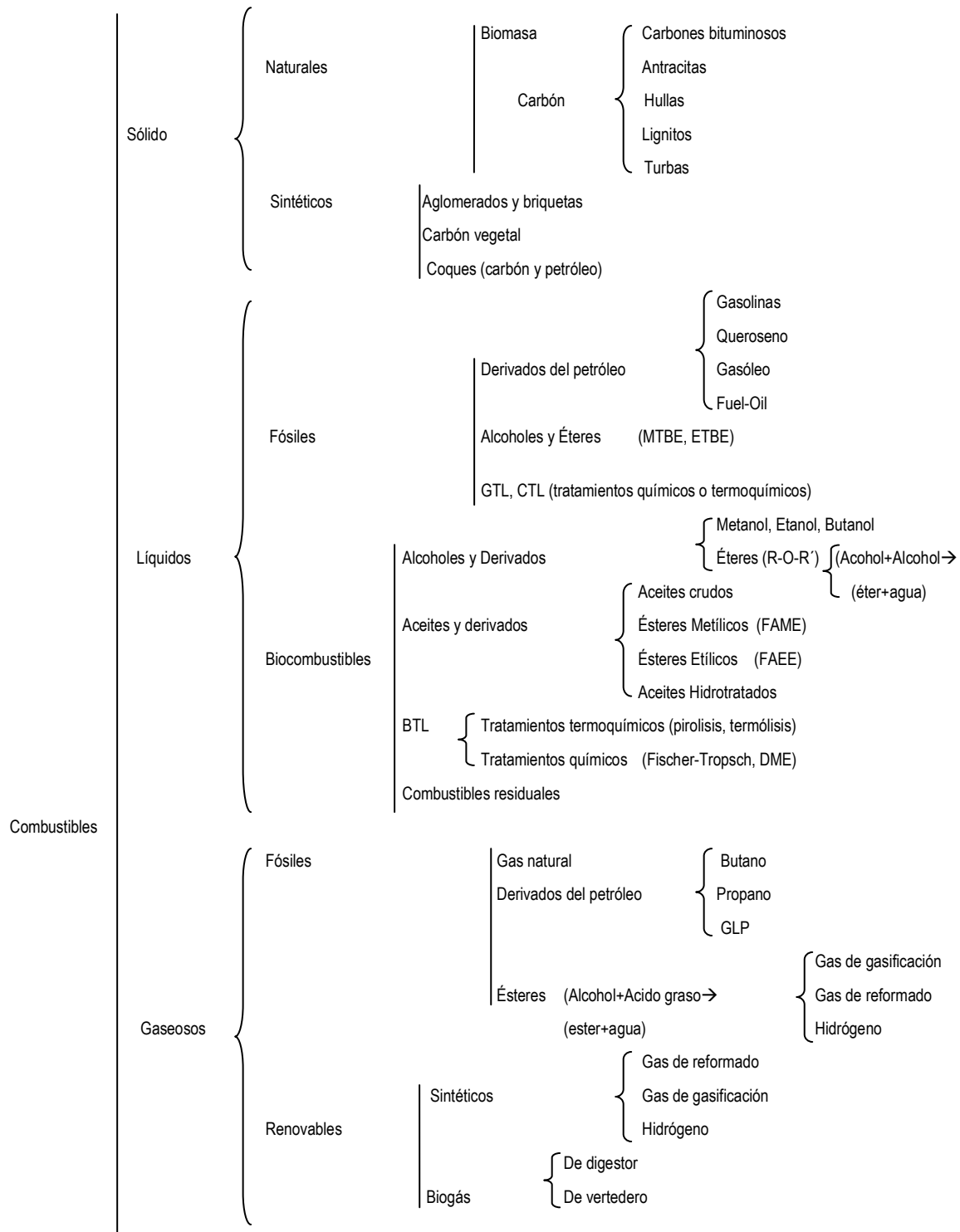


Ilustración 1: Clasificación de los combustibles en Automoción (Elaboración Propia)

Los **combustibles sólidos** se pueden dividir en **Naturales** o **Sintéticos**. Dentro de los primeros se encuentra la **Biomasa** y el **Carbón** (Antracita, Hulla, Lignitos...). Así la división más extendida dentro de los combustibles sintéticos sólidos es **Carbón de madera** y el **Coque de Hulla**. Se describen brevemente a continuación:

- **Biomasa:**

Se define como el conjunto de materia orgánica renovable de origen vegetal, animal o procedente de la transformación natural o artificial de la misma que son susceptibles de ser utilizados para fines distintos de los alimentarios o industriales. Proviene de la energía solar gracias al proceso de fotosíntesis.

Puede clasificarse según su origen en **Natural** (la que se produce en los bosques), **Residual** (Residuos forestales, Residuos agrícolas, Residuos Sólidos Urbanos, Residuos biodegradables), **Cultivos energéticos** y **Excedentes agrícolas**.

- **Carbón:**

Es una mezcla de carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, azufre, agua y cenizas, que inicialmente existía en forma de material vegetal y quedó enterrado en el lecho de pantanos y lagos. Debido a la acción combinada del tiempo, presión y temperatura, los vegetales se transformaron en carbón.

- **Carbón vegetal:**

La destilación seca de la madera o carbonización industrial se realiza en cámaras cerradas, sin aporte de aire, obteniéndose como productos sólidos (carbón vegetal), líquidos (ácido acético, acetona, metanol, agua, alquitrán, etc.) y gaseosos. El carbón vegetal resultante puede considerarse exento de azufre, conteniendo un 1 % de cenizas y, secado al aire, un 6-7 % de humedad. El poder calorífico está comprendido entre 31.400 y 37.000 kJ/kg.

- **Coque de Hulla:**

El coque de hulla es el combustible sólido industrial de mayor importancia. Se obtiene por destilación de la hulla a temperaturas superiores a los 1.000 °C. Su poder calorífico es del orden de 31 500 kJ/kg.

Los **combustibles líquidos** de origen fósil que se usan en motores o turbinas para el sector del transporte se derivan del petróleo (gasóleos, gasolinas, queroseno y fuelóleos), aunque existen también procesos de transformación gas-líquido o incluso sólido-gas-líquido que pueden aprovecharse para obtener combustibles aptos para los MCIA a partir del gas natural o de carbón como son los GTL (Gas-To-Liquid) o CTL (Carbon-To- Liquid), ambos se basan en procesos de reformado catalítico Fisher- Tropsch, o incluso combustibles de fuentes de origen renovable como el BTL (Biomass-To-Liquid). [Tinaut, 2011b].

En la Ilustración 2 se muestra el esquema general de una refinería con los productos que se obtienen mediante los diferentes procesos a partir del crudo y mediante la destilación del mismo tanto a Presión Atmosférica como a Vacío (40 mmHg), a continuación, en la Ilustración 3 se muestran las fracciones obtenidas de destilación

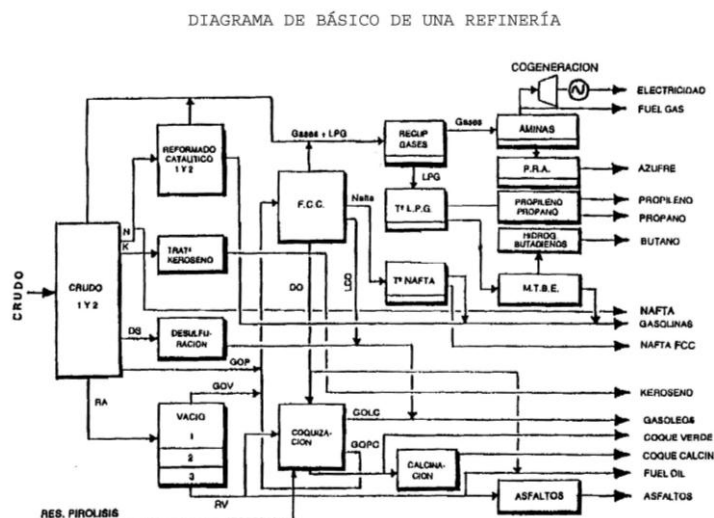


Ilustración 2: Esquema básico de una refinería (Procesos de Química Industrial; USC, 2003)

	Producto	Intervalo de temperatura de ebullición	Longitud de la cadena	Aplicaciones
Fracciones ligeras	Gas de refinería	< 20 °C	C1 - C2	Combustible para la refinería, calefacción doméstica e industrial
	GLP	< 20 °C	C3 - C4	Combustible para la refinería, calefacción doméstica e industrial
	Gasolina directa	40-150 °C	C5 - C9	Combustible para automóviles
	Nafta pesada	150-200 °C	C10 - C12	Materia prima para productos químicos, disolvente
Fracciones medias	Queroseno	170-250 °C	C13 - C17	Lámparas de alumbrado, combustible para turborreactores
	Gasoil	250-320 °C	C17 - C20	Combustible para motores diesel
Fracciones Pesadas	Fuel oil ligero	340-400 °C	C20 - C35	Combustible para buques, locomotoras, etc.
	Fuel oil pesado	400-500 °C	C20 - C35	Materia prima para lubricantes, ceras y parafinas, cremas, aceites
	Asfaltos	> 500 °C	> C35	Pavimentación, impermeabilización, abrasivos, electrodos

Ilustración 3: Fracciones de destilación por orden de volatilidad y longitud de las cadenas. [Cerdeira, 2013]

Los combustibles gaseosos de origen no renovable, siendo estos los de mayor uso en la industria de la automoción, se dividen en dos grupos, el primero es el **Gas Natural** y el segundo grupo son los **Gases Derivados del Petróleo**.

▪ **Gas Natural:**

El gas natural es una fuente energética de origen fósil compuesto por una mezcla de hidrocarburos gaseosos en la que predomina fundamentalmente el metano en igual o superior proporción al 79%, siendo los restantes componentes hidrocarburos saturados como el etano, propano, pentano, butano y pequeñas proporciones de otros gases como anhídrido carbónico, nitrógeno y en algunos casos ácido sulfhídrico, oxígeno e hidrógeno. La proporción en que están presentes estos gases no suele sobrepasar el 15 %. Es un producto incoloro, inodoro y no tóxico, además es más ligero que el aire (densidad relativa <1). Licúa a una temperatura de -160 °C y su relación volumétrica es de GN/GNL: 580. Posee un estrecho límite de inflamabilidad y elevada temperatura de combustión. [Prieto, 2013]

El gas natural proviene de un proceso análogo al de formación del petróleo y se puede encontrar en los pozos petrolíferos junto al crudo (gas natural asociado) o bien en yacimientos propios (gas natural no asociado).

▪ **Gases Derivados del Petróleo:**

Los principales productos derivados del petróleo son:

- **Propano (C₃H₈):** Es un hidrocarburo que en su estado comercial suele denominarse aire propanado, es una mezcla de aire y propano, Las mezclas de propano con el aire pueden ser explosivas con concentraciones del 1,8 al 9,3 % en volumen de propano.
- **Butano (C₄H₁₀):** Es un hidrocarburo que comercialmente es un gas licuado, obtenido por destilación del petróleo, compuesto principalmente por butano normal (60%), propano (9%), isobutano (30%) y etano (1%).
- **GPL:** Se obtienen por destilación fraccionada del petróleo en el rango de temperaturas comprendido entre -5 y 30°C. También se producen en los procesos de craqueo y reformado catalítico. Otra fuente de obtención alternativa es por eliminación de los componentes más pesados (C₃ y C₄) en los procesos de purificación del gas natural. Sus componentes fundamentales son propano y butano con una proporción aproximada del 70-30% para cada uno de ellos. A presión de en torno a 10 bar se transforma en líquido, puede licuarse a temperatura ambiente, es más denso que el aire. Pertenecen a los hidrocarburos clase A. Se le denomina Autogás en Automoción

Los combustibles de origen renovable en estado de agregación tanto líquido como gaseoso se describen en el apartado 2.5 del presente trabajo, ya que precisan de una serie de procesos que se describirán en el mismo.

2.3 Propiedades Físicoquímicas de los combustibles para Automoción

Las principales propiedades físicoquímicas de los combustibles para automoción se clasifican según su estado, por lo que se establecerá una diferencia para los combustibles líquidos y gaseosos, que son los más usados en Automoción, aunque también se hará una pequeña mención a los combustibles sólidos y en especial dentro de estos aquellos de origen renovable.

Con el fin de mejorar las propiedades físicoquímicas de los combustibles y cumplir las normativas medioambientales, a los combustibles se le añade una serie de **aditivos** que son sustancias que se añaden al combustible base en pequeñas cantidades (ppm) para obtener las características requeridas. Los aditivos pueden ser añadidos en las distintas fases de distribución del producto. La utilización de componentes procedentes del craqueo de cadenas más largas tanto en gasolinas como en gasóleos ha aumentado la reactividad de los combustibles, requiriéndose aditivos **antioxidantes y estabilizadores**. La tendencia a hacer desaparecer el plomo de las gasolinas ha traído consigo cambios en las características de los aditivos y componentes de la gasolina. Actualmente los compuestos oxigenados se utilizan como un componente de las gasolinas sin plomo, mejorando del índice de octano. También se explotan sus ventajas como elementos que contribuyen a la reducción de emisiones (CO, HC).

2.3.1 Propiedades físicas, químicas y físicoquímicas de los sólidos

Las principal característica de los sólidos como combustibles en la Automoción, se encuentran en combustibles de origen renovable que son los que tienen importancia después de los diferentes procesos para la obtención de biocombustibles líquidos y gaseosos, ya que desde el punto de vista de la Automoción y en especial referido a la propulsión para la movilidad, los combustibles sólidos no se utilizan. Así se reseñan una serie de propiedades físicas, químicas y físicoquímicas que caracterizan a los sólidos. [Ortiz, 2013]

- **Propiedades físicas de los biocombustibles sólidos de origen renovable:** Forma y tamaño, Superficie específica, Aspecto (color, brillo), Densidades: (Masa/Volumen), Humedades (Contenido de Agua), Friabilidad: (Facilidad para desmenuzarse), Resistencia a la compresión, Adsorción de gases: (es un proceso físico o químico por el cual átomos, iones o moléculas son atrapadas o retenidas en la superficie de un material)
- **Propiedades químicas de los biocombustibles sólidos de origen renovable:** Composición química elemental, Composición química por compuestos, Poderes caloríficos.
- **Propiedades Físicoquímicas de los biocombustibles sólidos de origen renovable:** Coeficiente de conductividad térmica (Capacidad de conducir calor por un material), Combustibilidad e inflamabilidad (Temperaturas y tiempos de combustión e inflamación), Temperatura máxima de llama, Potencia calorífica (referido a la caldera), Densidad energética (J/kg o Wh/kg), Índices de calidad energética.

2.3.2 Propiedades físicoquímicas de los líquidos

Proceden en un 99 % de la destilación fraccionada del petróleo y consisten en una mezcla de diversos hidrocarburos. Durante el proceso de mezcla con el aire, los combustibles líquidos deben vaporizarse o atomizarse. [Tinaut, 2011a]

Las principales propiedades de los combustibles líquidos para Automoción se enumeran en los siguientes puntos:

- **Densidad:**

Se define como la masa de un cierto volumen de combustible a una determinada temperatura y presión. Incluso si el combustible es líquido, su densidad depende de la presión y en mayor medida de

la temperatura. La densidad de los gases es muy variable con la presión y la temperatura. Por ello se suele referir al volumen en condiciones normales (0°C y 1 atm), expresándose en kg/Nm³. El modelo de gas ideal $p/p = mRT$ ó $PV=nRT$ no es adecuado, recurriéndose a tablas o ecuaciones de estado específicas.

Se debe tener en cuenta que en los sistemas de inyección de combustible en los motores son volumétricos. La inyección tiene lugar a una cierta presión (muy elevada en el caso de los diesel y relativamente baja en los motores a gasolina) y a temperaturas mayores que la atmosférica, como consecuencia del calentamiento provocado por la compresión o por la proximidad con las zonas calientes del motor. Todo ello obliga a considerar las variaciones de densidad del combustible en el diseño del sistema de inyección, considerando que los gradientes de densidad de los combustibles tienen un impacto negativo en las emisiones y en el rendimiento.

▪ Viscosidad

Se define como la medida física de la resistencia que opone un líquido a fluir cuando se le aplica una fuerza exterior. Es importante en las etapas de almacenamiento y trasiego del combustible y también influye en el proceso de combustión se distinguen dos tipos de viscosidad, **la viscosidad absoluta** y **la viscosidad cinemática**.

La primera, **viscosidad absoluta** se define como el valor de viscosidad para el cual la fuerza de una dina, aplicada sobre una superficie plana de 1 cm², la desplaza a una velocidad de 1 cm/s respecto a otra superficie plana de 1 cm² situada a 1 cm de distancia de la primera en el seno del fluido.

La **viscosidad cinemática** se define como el cociente entre la viscosidad absoluta y la densidad, medidas ambas a la misma temperatura. Su unidad en el sistema CGS es el stoke: $1St = (g/cm.s) / (g/cm^3) = cm^2/s$. Así la viscosidad cinemática de un combustible es un parámetro importante ya que debe tener un valor suficiente bajo como para poder circular por los circuitos de alimentación sin excesivas pérdidas de carga, y lo suficientemente elevada como para cumplir con exigencias de lubricación en algunos casos como el gasoil y el fuel-oil. Los ensayos para determinar la viscosidad cinemática de los fluidos se lleva a cabo en viscosímetros (capilares que por los que fluye un volumen de fluido, en un determinado tiempo). Se rigen los ensayos por la norma EN-3104 y con una temperatura de 40°C ya que esta influye notablemente sobre la viscosidad, la viscosidad de los líquidos disminuye con la temperatura. [Tinaut, 2011a]

▪ Lubricidad

La lubricidad es una especificación que en el caso de gasóleos indica la capacidad de lubricación del mismo. Se determina mediante el diámetro medio de la huella generada en ensayos de desgaste entre una bola sometida a un movimiento oscilatorio y un disco plano bañado por el combustible. En gasóleos debido a los procesos de desulfuración se pierde lubricidad que luego se restaura mediante aditivos, generalmente mediante pequeñas proporciones de biodiesel.

Aunque la viscosidad y la lubricidad están relacionadas, son propiedades diferentes, la primera es reológica (estudio de la deformación y el fluir de la materia) y la segunda es tribológica (es la ciencia que estudia la fricción, el desgaste y la lubricación que tienen lugar durante el contacto entre superficies sólidas en movimiento).

▪ Inflamabilidad

La inflamabilidad se define como la capacidad del combustible para formar una mezcla con el aire susceptible de arder ante la presencia de una llama o chispa.

Posee una serie de características asociadas que se citan a continuación

- **Límites de inflamabilidad:** Se define como la proporción combustible/comburente que permite que se produzca la reacción de combustión. Existen dos para cada combustible, el superior y el inferior, ambos dependientes de la Presión y la Temperatura. Un llama puede progresar siempre que la relación de mezcla combustible vaporizado/aire este

comprendida entre el límite inferior y superior, si está fuera se extingue. En mezclas homogéneas (por ejemplo motores MEP), en la práctica: $0,8 < Fr < 1,3$ (carburadores), $1 < Fr < 1,15$ (inyección con catalizador) $0,3 < Fr < 1,3$ (inyección directa). En mezclas no homogéneas (llamas de difusión: motores Diesel o MEC, quemadores de calderas, etc.). $0,74 < Fr < 2,1$

- **Temperatura de inflamabilidad (Flash Point):** Es la mínima temperatura a la que existe peligro de inflamación de un combustible ante la proximidad de un agente exterior, a una presión determinada (generalmente presión atmosférica). A menor temperatura de inflamación, mayor es el riesgo de incendio. Se pueden distinguir cuatro categorías: **Clase A:** Hidrocarburos licuados cuya presión de vapor a 15°C sea superior a 1 kg/cm^2 (GLP, GNL). Son gases a presión y temperatura ambientales. **Clase B:** Hidrocarburos cuyo punto de inflamación es inferior a 55°C y no pertenecen a la clase A (gasolinas, naftas, kerosenos, alcoholes,...). **Clase C:** Hidrocarburos cuyo punto de inflamación está comprendido entre 55°C y 120°C (gasóleos, fuelóleos). **Clase D:** Hidrocarburos cuyo punto de inflamación es superior a 120°C (asfaltos, vaselinas, parafinas,...).
- **Temperatura de autoinflamación:** Se define como la temperatura mínima a la que un combustible se autoinflama al entrar en contacto con el aire
- **Número de Octano (ON):** Es la resistencia a la autoinflamación de un combustible a unas determinadas condiciones de Presión y Temperatura. Tiene especial interés en MEP, en los que se desarrolla un frente de llama que avanza barriendo la mezcla de reactivos presente en la cámara. Así el **Índice de octano (NO)** se define como la proporción de iso-octano ($i\text{-C}_8\text{H}_{18}$, 2,2,4 trimetilpentano) en una mezcla con n-heptano ($n\text{-C}_7\text{H}_{16}$) que tiene la misma tendencia a la autoinflamación que el combustible considerado. El iso-octano es un combustible con baja tendencia a la detonación ($\text{NO}=100$) y el n-heptano es combustible muy detonante ($\text{NO}=0$).
- **Número de Metano (MN):** Indica la resistencia a la autoinflamación de un combustible, pero en este caso gaseoso. Cuanto mayor es el número de metano menor es la tendencia a que ocurra el picado. El valor de (MN) indica la concentración de metano en hidrógeno.
- **Número de Cetano (NC):** Es una magnitud relacionada con el tiempo de retraso de un motor diesel (periodo transcurrido desde el comienzo de la inyección hasta el de combustión) y por lo tanto una medida de la calidad de autoencendido de los gasóleos. Indica el porcentaje en volumen de n-cetano ($\text{C}_{16}\text{H}_{34}$) contenido en una mezcla con metilnaftaleno ($\text{C}_{10}\text{H}_7\text{CH}_3$) con la cual se obtiene el mismo retraso a la autoinflamación que el del combustible analizado. Toman valores ($\text{NC}=100$) para el n-cetano que es un combustible con un tiempo de retraso pequeño y ($\text{NC}=0$) para el metilnaftaleno que es un combustible con tiempo de retraso elevado ($\text{NC}=0$). Se trata de una propiedad inversa al número de octano. El combustible que se comporta correctamente en MEP, es malo para MEC y el que es bueno en MEC, no lo es en MEP.

▪ **Volatilidad:**

Es la tendencia que tiene un combustible a evaporarse en unas determinadas condiciones. Un combustible es más volátil cuanto menor es su temperatura de ebullición. La mayoría de combustibles debido a su carácter multicomponente, no tiene un punto de ebullición fijo sino que, todos ellos con diferentes puntos de ebullición y diferentes comportamientos en procesos de evaporación, por lo que para caracterizar un combustible desde el punto de vista de la volatilidad se tendrá que recurrir a medir propiedades de la mezcla. Las propiedades más importantes relacionadas con la volatilidad son la **curva de destilación**, la **presión de vapor**, y la **entalpía de vaporización**.

- **Curva de destilación:** Indica el porcentaje en volumen de combustible vaporizado en función de la temperatura.

- **Presión de vapor a una Temperatura dada:** Se define como la presión a la que se establece el equilibrio líquido/vapor. Un líquido es más volátil cuanto mayor es su presión de vapor.
- **Entalpía de vaporización:** Es la energía absorbida del ambiente cuando el combustible se evapora presenta las siguientes características: Mayor rendimiento volumétrico, Mayor dificultad de evaporación → Menor rendimiento térmico, Problemas de arranque en frío por formación de hielo.

- **Residuo Carbonoso:**

Se define como la materia que permanece después de someter la muestra a un proceso de evaporación y pirólisis. Indica la tendencia del combustible a descomponerse en los calentamientos previos, formando inquemados que obstruyen los inyectores.

- **Propiedades en flujo frío:**

Las propiedades del flujo frío se relacionan con la tendencia del mismo a la formación de cristales, las propiedades de flujo frío más usadas son: [Tinaut, 2011b]

- **Punto de niebla:** Temperatura a la que empieza la formación de los primeros cristales cuando se somete a enfriamiento normalizado al combustible.
- **Punto de vertido:** Temperatura a la que todo el combustible adquiere un estado gelatinoso cuando se somete a enfriamiento normalizado.
- **Punto de observación de filtros en frío (POFF):** Temperatura a la que se obstruyen los filtros por causa de la aglomeración de los cristales formados en el ensayo normalizado.
- **Friabilidad:** Expresa la tendencia a la obstrucción de filtros, pero controlando la caída de presión y caudal a través de este.

De los combustibles usados en MCIA, el más crítico en cuanto a sus propiedades de flujo en frío es el biodiesel, debido a que las cadenas carbonosas que lo componen son lineales y se ve afectado por el punto de niebla y el punto de vertido, lo que hace que las materias primas del biodiesel tengan que ser seleccionadas en función de la región y época del año.

- **Estabilidad:**

Se define como la resistencia a su degradación, puede ser térmica u oxidativa, pero es la segunda la que se vuelve crítica durante el almacenamiento dando lugar a **gomas**. [Tinaut, 2011a]

Los biocarburantes, en general, son más degradables que los combustibles derivados del petróleo, por lo que es necesario añadirles aditivos antioxidantes.

- **Impurezas:**

Existen varios parámetros de calidad para la medición de impurezas derivadas de los procesos de producción, distribución y almacenamiento. Especial mención requieren los contenidos en azufre, agua (depende del carácter higroscópico del combustible, mucho mayor en biodiesel y etanos que en gasóleos y gasolinas), ácidos grasos libres, glicerina, mono, di, triglicéridos, ácidos libres, metales, partículas sólidas... Si las partículas son suficientemente duras y en cantidades considerables, también pueden producir desgastes prematuros en bombas e inyectores. Este tipo de partículas aparece generalmente como cenizas.

2.3.3 Propiedades fisicoquímicas de los gases.

Además de las propiedades fisicoquímicas mencionadas en el apartado anterior los gases poseen alguna propiedad específica de los gases, se enumeran a continuación las más importantes:

▪ Índice de Wobbe

Para un combustible gaseoso es la relación entre su poder calorífico superior y la raíz cuadrada de su densidad específica (relativa al aire):

$$W = \frac{P.C.S}{\sqrt{\rho_e}} \qquad \rho_e = \frac{\rho}{\rho_{aire}}$$

Ecuación 1: Índice de Wobbe

Se controla este índice para asegurar la combustión satisfactoria del gas en el quemador. Así, los combustibles gaseosos se clasifican en las siguientes familias según el Índice de Wobbe.

- **Primera Familia:** Índice de Wobbe comprendido entre 23,86 y 31,4 MJ/Nm³. A esta familia pertenecen el gas manufacturado, el gas de coque y el gas de mezcla hidrocarburo-aire de bajo índice de Wobbe (aire metanado).
- **Segunda familia:** Índice de Wobbe comprendido entre 41,28 y 57,99 MJ/Nm³. A esta familia pertenecen los gases naturales y las mezclas de hidrocarburos-aire de alto índice de Wobbe (aire propanado).
- **Tercera familia:** Índice de Wobbe comprendido entre 77,46 y 92,40 MJ/Nm³. En este grupo están los GLP (propano y butano comerciales).

▪ Punto de rocío

Temperatura a la cual, a una determinada presión, se produce la condensación del gas, es decir es la temperatura a la cual se produce la saturación del vapor en una mezcla gas-vapor. En algunos casos, como con los óxidos de azufre se pueden producir corrosiones cuando se produce una condensación del mismo, por ejemplo, el H₂SO₄ es un producto corrosivo cuyo punto de rocío está en torno a 150°C.

2.4 Propiedades Termoquímicas de los combustibles para Automoción

Las principales propiedades termoquímicas de los combustibles para automoción son:

▪ Composición elemental:

El análisis químico del combustible, sobre todo si es sólido, es necesario para poder efectuar los cálculos referentes a la combustión y da los resultados en porcentajes en peso, de los constituyentes de mismo que son los siguientes: Carbono total, Hidrógeno, Azufre, Nitrógeno, Oxígeno y cenizas o compuestos metálicos. [Cerdeira, 2013]

▪ Poder Calorífico:

La calidad de un combustible viene dada por la cantidad de calor que desprende en la combustión, calculada para la unidad de masa (kJ/kg ó kcal/kg) (caso de los combustibles sólidos y líquidos) o de volumen (kJ/m³ ó kcal/m³) (combustibles gaseosos). Se distinguen dos tipos de poderes caloríficos:

- **Poder Calorífico Superior (P.C.S.):** cantidad de calor desprendida al quemar un kilogramo de combustible, teniendo en cuenta el calor desprendido por la condensación del vapor de agua contenido en los productos de la combustión.
- **Poder Calorífico Inferior (P.C.I.)** es el calor desprendido por kilogramo de combustible, descontando la energía calorífica absorbida por la vaporización del agua contenida en los productos de la combustión.

La diferencia entre ambos es el calor latente de vaporización del agua resultante de la combustión del combustible. [Tinaut, 2011b]

▪ **Dosado:**

La relación entre las masas de combustible y aire usadas en la reacción de combustión se denomina dosado.

- **Dosado estequiométrico (Fe):** Dosado para producir la reacción estequiométrica (sin exceso ni defecto de oxígeno).
- **Dosado relativo (Fr):** Relación entre el dosado real y el estequiométrico. (Su inverso se conoce como exceso de aire). [Tinaut, 2011a]

▪ **Temperatura adiabática de llama:**

Se define como la temperatura que alcanzan los productos de la combustión cuando todo el calor de la reacción se invierte en calentar dichos productos, es decir que la reacción se produce de forma adiabática. En MCIA la temperatura que alcanzan los productos de la combustión es muy cercana a la adiabática de llama, debido a que la velocidad de combustión es relativamente alta y hay muy poco tiempo para transmitir calor, además el trabajo desarrollado por el pistón es pequeño ya que se encuentra en las cercanías del PMS, donde la velocidad de este es reducida.

Es un parámetro importante por su efecto controlador en la velocidad de las reacciones químicas, su importancia en el diseño de zonas calientes en cámaras de combustión, su notable efecto sobre la formación de óxidos de nitrógeno y su importancia para la determinación de la temperatura de radiación a partir de los productos de combustión.

La temperatura adiabática disminuye con el contenido de oxígeno del combustible, aumenta con el grado de insaturación y varía ligeramente con la longitud de la cadena carbonosa. Aumenta en los hidrocarburos saturados y disminuye en los insaturados, así puede observarse que las temperaturas de llama de las gasolinas suele ser inferior a la de los gasóleos. [Tinaut, 2011b]

2.5 Combustibles de origen renovable

2.5.1 Obtención de combustibles renovables a partir de biomasa

Los combustibles de origen renovable en estado líquido, son el resultado de un proceso de transformación de biomasa dando lugar a alcohol etílico (bioetanol) y derivados o aceites vegetales (bioaceites) y derivados. Su aplicación principal es sustituir a los combustibles líquidos convencionales en motores térmicos, sobre todo para el sector del transporte. [Cerdeira, 2013]

Sin embargo lo que caracteriza a un combustible comercial determinado es el cumplimiento de una serie de propiedades fisicoquímicas cuyos límites están establecidos en las normas. En la selección de un combustible alternativo o de sustitución se debe tener en cuenta al combustible al que sustituyen como la característica que pretenden simular. Así existen combustibles de sustitución físicos (que simulan propiedades como la densidad, poder calorífico, viscosidad...), químicos (peso molecular, pertenecer a la misma familia), o de comportamiento (que simulan alguna propiedad derivada del uso del combustible como la velocidad de combustión).

Para seleccionar el combustible de sustitución más adecuado es necesario verificar los siguientes criterios: [Tinaut, 2011b]

- **Semejanza:** El combustible de sustitución debe ser capaz de reproducir la característica deseada, verificándolo mediante ensayos experimentales.
- **Representatividad:** Debe incluir las principales familias de hidrocarburos en una proporción semejante a la del combustible original.
- **Coste económico:** El coste económico de los compuestos que forman parte del mismo debe ser tan bajos como sea posible.

- **Simplicidad:** El número de compuestos debe ser el mínimo necesario para que el combustible de sustitución sea capaz de simular la característica objetivo.
- **Disponibilidad:** Para modelar el proceso de combustión, las reacciones involucradas en dicho proceso deben ser conocidas, para los componentes considerados.

La biomasa, y por tanto, los productos derivados de ella son de carácter renovable, con una serie de ventajas medioambientales (balance cero de CO₂ en la combustión, mínima presencia de compuestos sulfurados o nitrogenados, ausencia de partículas, diversificación energética...). La energía que puede obtenerse a partir de la biomasa proviene de la energía solar, que gracias al proceso de fotosíntesis es aprovechada por las plantas verdes mediante reacciones químicas en las células vivas, para tomar dióxido de carbono del aire y transformarlo en sustancias orgánicas.

La biomasa presenta inconvenientes tales como, su producción estacional y los mayores costes de producción, acondicionamiento, transporte y almacenamiento. En este sentido, actualmente las tecnologías aplicadas a este tipo de fuente están inmersas en una etapa de gran desarrollo.

La gran variedad de materiales incluidos dentro del concepto de biomasa (residuos agrícolas, forestales, ganaderos, industriales, y urbanos), permite a su vez plantear una gran cantidad de posibles aplicaciones energéticas (térmica, eléctrica, o mecánica). Son ambos parámetros tipo de biomasa y aprovechamiento energético, los que marcan el tratamiento previo o tecnología de adecuación (tratamientos termoquímicos, biológicos, o químicos) a que debe ser sometida la biomasa.

Así, la energía útil a partir de esta biomasa se puede conseguir de las siguientes formas: [Melgar, 2013]

	Tecnología	Aplicación
Termoquímico	Combustión	Calor Vapor de Agua
	Pirólisis	Combustibles sólidos, líquidos y gaseosos
	Gasificación	Combustibles gaseosos
Biológico	Digestión Anaerobia	Metano
	Fermentación Alcohólica	Bioetanol
Químico	Hidrólisis	Bioetanol
	Transesterificación	Biogasóleo

Tabla 1: Procesos, Tecnologías y Aplicaciones de la biomasa. [Melgar 2013]

▪ Transformación mediante procesos Termoquímicos

Se basan en la descomposición producida cuando se somete la biomasa a altas temperaturas (200°C-1500°C) en atmósfera gaseosa controlada. En los procesos termoquímicos se usa biomasa residual de bajo contenido en humedad, dado que la evaporación del agua supone un gasto de energía negativo en el balance energético.

Mediante un control de las condiciones del proceso, es posible dirigir el mismo hacia la obtención de diferentes productos, lo que da lugar a los tres procesos principales de conversión termoquímica de la biomasa, combustión, gasificación y pirólisis. [Melgar, 2013]

- **Combustión directa:** Consiste en una reacción exotérmica de oxidación con aire, a temperaturas próximas a 1.000 °C, y siempre que el contenido de humedad sea inferior al 40 %. El poder calorífico inferior de la biomasa residual está entre 7.000 y 20.000 kJ/kg.

- **Gasificación:** Consiste en un complicado proceso de reacciones químicas que se producen en el interior del lecho y que dan lugar a una combustión incompleta. El gas pobre, así obtenido, contiene CO, H₂, N₂ y CH₄ y con un poder calorífico de 1.000 a 1.500 Kcal/m³ de gas.

Pirólisis: Consiste en someter a la biomasa a temperaturas de 500 a 600 °C en ausencia de oxígeno en cámaras aisladas; así, los constituyentes se transforman en una fracción sólida compuesta por carbono (carbón de coque), una fracción líquida (ácidos aldehídos, cetonas, alcoholes y compuestos fenólicos) y otra gaseosa (monóxido y dióxido de carbono, metano, etano, hidrógeno y vapor de agua). [Cerdeira, 2013]

- **Transformación mediante procesos biológicos:**

Consisten en la transformación de la biomasa por la acción de microorganismos o de enzimas que son añadidas como catalizadores. Con una elevada especificidad de la acción enzimática sobre tan sólo determinadas fracciones de la biomasa, el rendimiento energético de estos procesos es bajo, influyendo negativamente en la viabilidad económica. Los procesos biológicos de conversión de la biomasa presentan la ventaja de desarrollarse siempre en condiciones suaves de temperatura, presión, pH, etc., por lo que las tecnologías asociadas a los mismos pueden, en general, considerarse como blandas, es decir, de bajos costes de inversión y poco intensivas bajo un punto de vista energético. Cabe destacar dos métodos bioquímicos de conversión, la digestión anaerobia y la fermentación alcohólica.

- **Digestión Anaerobia:**

Es una de las vías por las que se descompone la materia orgánica, a través de procesos biodegradativos realizados por asociaciones bacterianas. Este proceso se aplica a todas aquellas biomásas biodegradables, tanto primarias como secundarias. En tratamientos biológicos (Secundarios), para la eliminación de la materia orgánica solubilizada muy cargada en aguas residuales, es un proceso en serie. El reactivo es la materia orgánica, y productos se obtienen CO₂ y CH₄ en condiciones anaerobias (Ecuación 2). [Omil, 2003]

Materia Orgánica + N₂P + microorganismos → Nuevas células + biogás + residuos no biodegradables

Ecuación 2: Ecuación para producción de biogás

El glucógeno (cadenas ramificadas de glucosa), al degradarse va a ser atacado por las bacterias hidrolíticas. A partir de la glucosa que es utilizada por las bacterias acidogénicas, en la que se forman ácidos de cadena larga. Todos estos ácidos van a formar ácido acético y se libera hidrógeno en la tercera etapa (Acetogénica) y en la cuarta etapa reaccionan el acético y el hidrógeno para formar metano. Se pueden distinguir las siguientes etapas: **Hidrólisis, Acidogénesis, Acetogénesis, Metanogénesis.** [Omil, 2003], [Melgar, 2013].

- **Fermentación alcohólica (obtención de combustibles líquidos de origen vegetal)**

Este proceso químico transforma los hidratos de carbono de la biomasa vegetal (con contenido importante en azúcares) en alcohol (etanol) por la intervención de microorganismos como las levaduras que producen enzimas que catalizan la reacción.

Consta de varias etapas: preparación del mosto, hidrólisis, fermentación, destilación, y deshidratación del alcohol. Se realiza sobre productos azucarados como el maíz, sorgo, caña de azúcar, manzana, o remolacha azucarera, con la intervención de microorganismos cuya acción debe ser controlada con relación al pH, temperatura, etc. Como resultado se obtiene bioetanol que puede sustituir al fuelóleo y gasóleo en quemadores, o a gasolinas en motores de explosión. [Melgar, 2013]

En general, considerando globalmente la actividad humana, se estima una producción anual de biomasa residual es de dos toneladas por habitante, con un poder energético de 9.000 kWh/año, que equivale a unos 800 litros de gasolina.

▪ **Transformación mediante procesos químicos:**

Estos procesos están relacionados con reacciones de degradación o digestión química, generalmente hidrólisis, de los componentes de la biomasa: poliazúcares (almidón, celulosa, hemicelulosa) y lignina, para dar lugar a compuestos más simples como son los monosacáridos, de gran interés en la obtención de productos energéticos (bioetanol) y derivados fenólicos de la lignina, muy apreciados por la industria química para la fabricación de plásticos, resinas, etc.

Otro ejemplo de proceso químico típico de conversión de la biomasa es la denominada transesterificación de aceites vegetales, consistente en una reacción de aceites y grasas vegetales con alcoholes como el metanol y etanol, para dar lugar a los ésteres vegetales denominados biogaseos, que pueden utilizarse como sustituto del gasóleo en motores diesel. [Melgar, 2013]

2.5.2 Combustibles líquidos de origen renovable

Actualmente los biocombustibles se han consolidado como sustitutivos parciales de los combustibles de origen fósil y en estado líquido son el biodiesel, como componente del gasóleo y el bioetanol y su éter derivado ETBE, como componente de la gasolina. Se consideran combustibles de primera generación debido a que proceden de semillas vegetales pero que no aprovechan la biomasa lignocelulósica cuyo desarrollo es imprescindible para dar lugar a dichas semillas. Por ello en la actualidad se fomentan los biocombustibles que pueden obtenerse de la biomasa lignocelulósica, permitiendo aprovechar el contenido carbonoso del conjunto del cultivo, son los llamados carburantes de segunda generación y su tecnología no está plenamente desarrollada, o no es suficientemente rentable. [Tinaut, 2011b]

Se denomina biodiesel a un combustible de origen animal o vegetal constituido por ésteres alquílicos de ácidos grasos. Para producir biodiesel los aceites vegetales se someten a una reacción química denominada transesterificación, en la que se combinan con un alcohol (metanol o etanol), en presencia de un catalizador, obteniéndose ésteres metílicos (FAME, Fatty Acid Methyl Esthers) o etílicos (FAEE, Fatty Acid Ethyl Esthers) y glicerina (**Alcohol con tres grupos hidroxilos, C₃H₈O₃**) como producto.

Los aceites vegetales y las grasas animales pueden someterse a procesos de hidrocraqueo en instalaciones apropiadas dando lugar a hidrocarburos parafínicos lineales, el producto final se llama Diesel renovable o HVO (Hydrotreated Vegetable Oil). En condiciones favorables de reacción pueden darse reacciones de isomerización y craqueo que favorezcan la formación de parafinas más ligeras y hacer un producto adecuado para sustituir a las gasolinas. [Tinaut, 2011b]

El bioetanol puede usarse como combustible mezclado con gasolina e incluso en motores diesel. Existen otros alcoholes que pueden ser usados en los motores de encendido por chispa y que son el metanol, etanol, butanol. [Tinaut, 2011b]

2.5.3 Combustibles gaseosos de origen renovable

Cada vez se fomenta más el empleo de sistemas de propulsión basados en combustibles gaseosos, ya que con ellos se aumenta la disponibilidad del recurso energético. Además su estado físico gaseoso permite una mejor formación de la mezcla reduciendo las emisiones contaminantes.

Por contra, el estado gaseoso de estos combustibles hace que la densidad de energía por unidad de volumen o unidad de masa (incluyendo el depósito a presión) sea menor que la de los hidrocarburos líquidos, disminuyendo la autonomía del vehículo. Esto hace que también se desarrollen sistemas de propulsión bi-fuel (gas-líquido). [Tinaut, 2011a]

2.5.4 Resumen métodos de producción y parámetros de biocombustibles

Todos los procesos comentados en estos apartados se resumen en el siguiente esquema

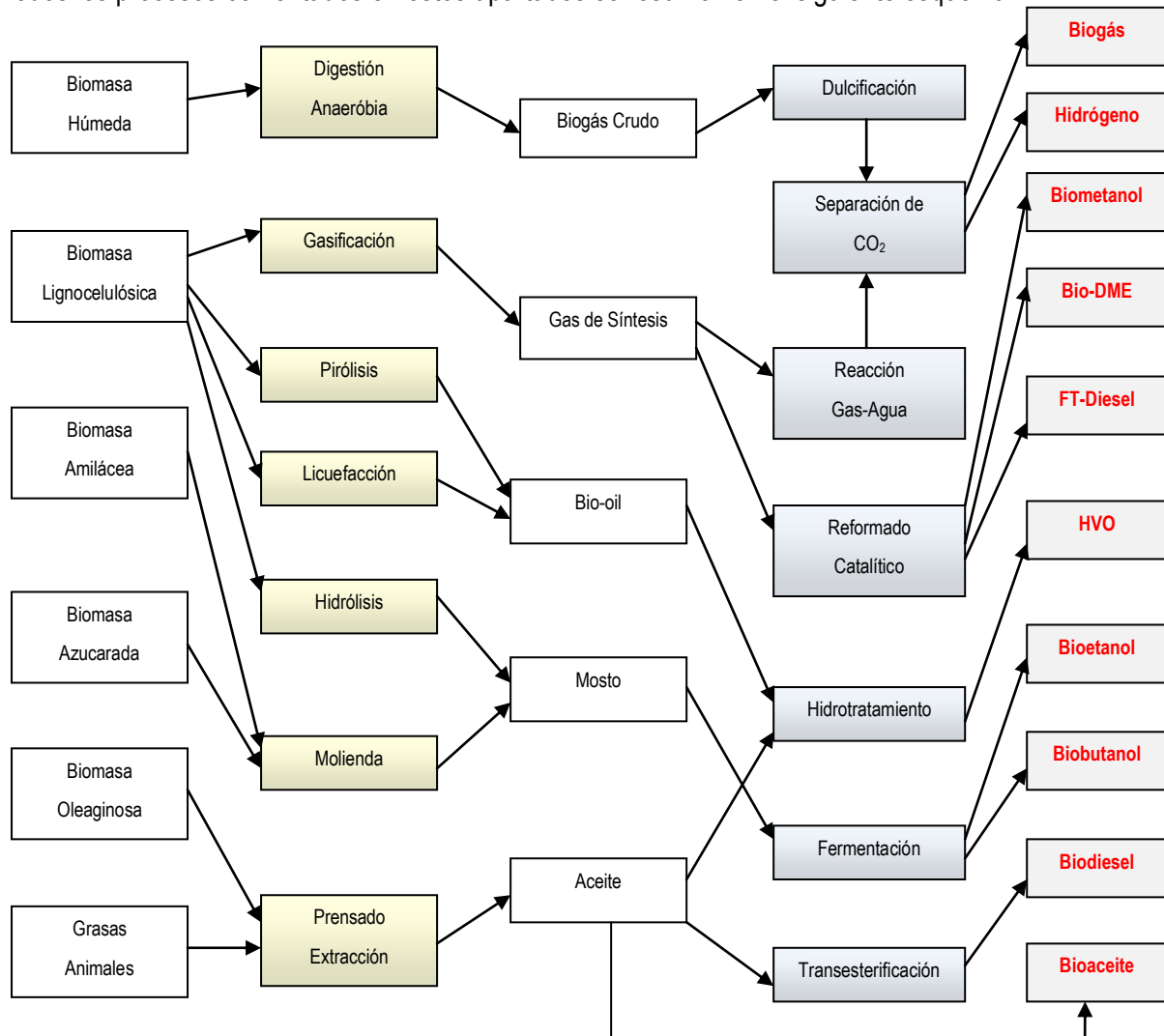


Ilustración 4: Métodos de producción de biocombustibles [Tinaut, 2011b]

2.5.5 Combustión de biocombustibles gaseosos en MCIA

Para estimar la potencia y otras prestaciones de los MCIA alimentados con biocombustibles gaseosos se citan a continuación dos niveles de aproximación; el primero basado en el parámetro EFQ (Engine Fuel Quality), y el segundo por medio de un modelado de la combustión, con el fin de presentar las prestaciones y emisiones contaminantes de los combustibles.[Tinaut, 2013]

▪ EFQ (Engine Fuel Quality):

La potencia de un motor se puede expresar mediante el gasto de combustible y el rendimiento del motor:

$$N_e = G_f \cdot H_c \cdot \eta_e$$

Ecuación 3: Potencia de un motor

Aplicando el dosado a la Ecuación 3 y sabiendo que es la relación aire combustible en masa

$$F = \frac{G_r}{G_a} \quad F_e = \left(\frac{G_r}{G_a} \right)_{\text{estequiométrico}} \quad F_r = \frac{F}{F_e}$$

Ecuación 4: Ecuación para dosado en MCIA

$$N_e = G_f \cdot H_c \cdot \eta_e = G_a \cdot F_e \cdot F_r H_c \cdot \eta_e$$

Ecuación 5: Ecuación del rendimiento de un MCIA en función del dosado

Teniendo en cuenta que el rendimiento volumétrico indica la calidad del llenado con respecto a las condiciones ideales, hace que la masa de aire se pueda expresar en función del gasto, el régimen de giro, y el tipo de motor $i=1$ para motores de dos tiempos, $i=1/2$ para motores de cuatro tiempos.

$$\eta_v = \frac{m_a + m_f}{V_D \cdot \rho_{mref}} = \frac{m_a}{V_D \cdot \rho_{aref}} \cdot \frac{(m_a + m_f) \cdot \rho_{aref}}{m_a \cdot \rho_{mref}} = \frac{m_a}{V_D \cdot \rho_{aref}} \cdot \frac{1}{C} = \frac{G_a}{i \cdot n \cdot V_D \cdot \rho_{aref}} \cdot \frac{1}{C}$$

Ecuación 6: Ecuación del rendimiento volumétrico

Despejando de la ecuación 6 el gasto de aire y sustituyendo en la Ecuación 5 se obtiene la Ecuación 7 en la que se relaciona la potencia del motor con parámetros constructivos del motor y del rendimiento.

$$N_e = \eta_v \cdot i \cdot n \cdot V_T \cdot C \cdot \rho_{aref} \cdot F_e \cdot F_r \cdot H_c \cdot \eta_e$$

Ecuación 7: Potencia de un MCIA

El coeficiente C representa la relación entre el volumen que ocupa el aire en el cilindro y el volumen total. En la ecuación 8 se demuestra que puede escribirse como la relación entre el volumen que ocupa el aire en el cilindro y el volumen total y es una propiedad del combustible.

$$C = \frac{m_a \cdot \rho_{mref}}{(m_a + m_f) \cdot \rho_{aref}} = \frac{m_a \cdot R_a}{(m_a + m_f) \cdot R_M} = \frac{V_a}{V_D} = \frac{n_a}{n_D} = \frac{\frac{m_a}{Pm_a}}{\frac{m_a}{Pm_a} + \frac{m_f}{Pm_f}} = \frac{\frac{1}{Pm_a}}{\frac{1}{Pm_a} + \frac{F}{Pm_f}}$$

Ecuación 8: Ecuación para el coeficiente C

Donde reordenando la ecuación 7 en función de sus parámetros se obtiene

$$N_e = [\eta_v \cdot \eta_e \cdot i \cdot V_T] \cdot \{n \cdot \rho_{aref} \cdot F_e\} \cdot \overbrace{C \cdot F_r \cdot H_c}$$

Ecuación 9: Rendimiento de un MCIA en función de parámetros de diseño, operación y EFQ

$$[\eta_v \cdot \eta_e \cdot i \cdot V_T] = K_D$$

Ecuación 10: Parámetro de diseño

$$\{n \cdot \rho_{aref} \cdot F_e\} = K_O$$

Ecuación 11: Parámetro de Operación

$$\overbrace{C \cdot F_e \cdot H_c} = EFQ$$

Ecuación 12: EFQ (Engine Fuel Quality)

El EFQ representa la energía por kilogramo de mezcla aire combustible (kJ/kg aire), es un parámetro dependiente del combustible.

Otros parámetros en la ecuación son: C: Factor de corrección volumétrico. i: Índice del tipo de motor (1 para 2-T, ½ para 4-T). Así como los rendimientos volumétrico y efectivo del motor. También están presentes los dosados relativo y el estequiométrico, entre otros.

Se puede realizar una interpretación alternativa de EFQ que se muestra en la Ecuación 13:

$$EFQ = \frac{H_{ve.vol}}{\rho_{aref}}$$

Ecuación 13: EFQ en función de poder calorífico y la densidad

$H_{ve.vol}$: el poder calorífico volumétrico de la mezcla admitida y ρ_{aref} : la densidad del aire de referencia.

Sustituyendo en la Ecuación 9 la Ecuación 13 se llega a:

$$N_e = K_D \cdot \{n \cdot F_e\} \cdot H_{ve.vol}$$

Ecuación 14: Rendimiento del motor en función del poder calorífico volumétrico de la mezcla admitida

Se muestra una propiedad energética en la ecuación 14 importante para un combustible cuando alimenta un MCIA que es el poder calorífico volumétrico de la mezcla estequiométrica. En la Tabla 2 se muestran un resumen de propiedades citadas en este apartado para distintos combustibles: [Melgar, 2013]

Combustible	Hc (MJ/kg f)	Fe (kg f/kg a)	C	EQF (MJ/kg a)	Ne (kW)
Gasolina	44,51	0,066	1,00	2956	37
Metano	50,15	0,058	0,90	2632	30
Biogás	17,21	0,09	-	1548,9	-
Gas Pobre	4,65	0,800	0,51	1851	23

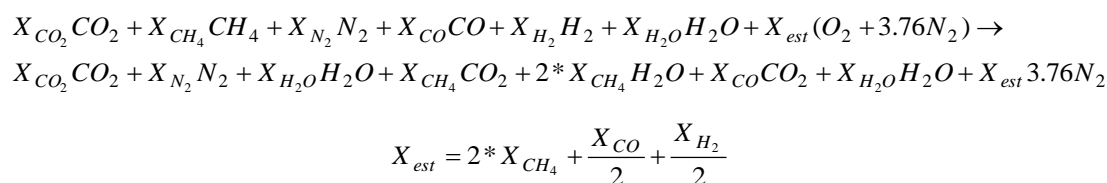
Tabla 2: Valores de combustibles para su caracterización en MCIA

Para el cálculo de propiedades de un combustible para un motor y asumiendo un combustible de una composición basada en CO, H₂ y CH₄ que puede contener inertes como CO₂, N₂ y H₂O. Es posible calcular las propiedades del combustible para determinar su EFQ. A partir de los datos de la Tabla 3. [Melgar, 2013]

Gases	Tipo	Pm (gr/mol)	Hf (kJ/mol)
CO ₂	P,C	44	-393,52
N ₂	P,C,A	28	0
H ₂ O (l)	P	18	-285,83
H ₂ O (g)	P,C	18	-241,82
O ₂	A	32	0
CO	C	28	-110,53
CH ₄	C	16	-74,85
H ₂	C	2	0

P:Producto C:Combustible A:Existente en el aire

Tabla 3: Valores de Pm y Poder Calorífico para reactivos y productos en una combustión genérica de biomasa



Ecuación 15: Ecuación genérica para determinan la composición de la combustión de biomasa

$$Fe = \frac{m_f}{m_a} = \frac{44X_{CO_2} + 16X_{CH_4} + 28X_{N_2} + 28X_{CO} + 2X_{H_2} + 18X_{H_2O}}{X_{est}(32 + 3,76 * 28)}$$

Ecuación 16: Ecuación genérica para determinan del dosado estequiométrico de la combustión de biomasa

$$Hc = \frac{Hf_R - Hf_P}{m_f} = \frac{(-74,85X_{CH_4} - 110,53X_{CO}) - (-241,82X_{CH_4} - 393,52X_{CO} - 393,52X_{CH_4} - 241,82 * 2X_{CH_4})}{44X_{CO_2} + 16X_{CH_4} + 28X_{N_2} + 28X_{CO} + 2X_{H_2} + 18X_{HO_2}}$$

Ecuación 17: Ecuación genérica para determinar el Poder Calorífico de la combustión de biomasa

$$Pm = \frac{44X_{CO_2} + 16X_{CH_4} + 28X_{N_2} + 28X_{CO} + 2X_{H_2} + 18X_{H_2O}}{X_{CO_2} + X_{CH_4} + X_{N_2} + X_{CO} + X_{H_2} + X_{H_2O}}$$

Ecuación 18: Ecuación genérica para determinar el Peso Molecular de la combustión de biomasa

Mediante las Ecuaciones 15,16,17,18 es posible calcular las propiedades del combustible para determinar su EFQ, tomando los valores de la Tabla 2.

▪ Velocidad de combustión:

El modelado del proceso de combustión simula la combustión que tiene lugar en el interior de la cámara que se inicia por una chispa eléctrica (MEP) y dura el tiempo que el frente de llama recorre la cámara. Se realizará lo más centrada posible con el PMS, y con el fin de centrar el proceso cerca del PMS se puede modificar el instante de inicio de la combustión y se simula un frente de llama esférico.

Se establecerán una serie de datos de entrada como son: **Geometría y Configuración, Variables de funcionamiento** (n, m_a, m_f, T), **Velocidad de combustión laminar, Flame Speed Ratio: Ratio** (relación entre la velocidad de combustión turbulenta y la laminar). [Tinaut, 2013]

La velocidad a la que avanza el frente de llama depende fundamentalmente de:

- **Naturaleza del combustible.**
- **Relación Aire-Combustible, alcanzado el máximo cerca del dosado estequiométrico**
- **Presión y Temperatura en la cámara**
- **Turbulencia en la cámara**
- **Proceso de expansión de los gases que se han quemado, implica que la velocidad del frente de llama sea mayor que la velocidad de combustión**
- **El efecto de la turbulencia sobre la velocidad de combustión se puede considerar lineal y representarlo mediante el FSR**
- **El FSR depende del diseño del motor y del régimen de giro, pero se puede decir que es muy independiente del tipo de combustible.**

3 El biogás como combustible alternativo para automoción

3.1 Introducción

Los mercados mundiales de biogás han aumentado considerablemente durante los últimos años y en muchos países se han desarrollado tecnologías modernas de biogás incentivadas por los mercados de biogás nacionales a lo largo de décadas de intensa investigación y desarrollo a través de organismos gubernamentales y el apoyo del sector público. El sector del biogás en Europa cuenta con miles de instalaciones de biogás, y países como Alemania, Austria, Dinamarca y Suecia se encuentran entre los precursores técnicos, con el mayor número de plantas de biogás modernas.

Se realizan importantes esfuerzos en investigación que en combinación con la experiencia a gran escala en todo el mundo y con el objetivo de mejorar las tecnologías de conversión, la estabilidad operativa y el proceso se han desarrollado nuevos digestores, tecnologías de sustratos, sistemas de alimentación en los biorreactores, instalaciones de almacenamiento, nuevos equipos, investigando además en cultivos energéticos para la producción de biogás aumentando la productividad y diversidad de los mismos para evaluar su potencial de biogás. La producción de cultivos energéticos provoca nuevas prácticas agrícolas como la rotación e intercalación de los sistemas de cultivos.

El diseño y la tecnología de las plantas de biogás difieren de país a país, dependiendo de las condiciones climáticas y los marcos nacionales (legislación y las políticas de energía), la disponibilidad de energía y asequibilidad. En base a su tamaño relativo, la función y la ubicación, agrícola las plantas de digestión anaeróbica se pueden clasificar como:

- **Plantas de biogás de muy pequeña escala (familiar)**
- **Plantas de biogás de mediana escala (granja)**
- **Plantas de codigestión e escala grande (centralizados)**

La utilización de biogás para la producción combinada de calor y electricidad (CHP) es una aplicación en las tecnologías de biogás en Europa. El biogás también se utiliza como biocombustible renovable para el transporte en países como Suecia, Suiza y Alemania, donde las redes de gas y las estaciones de servicio tienen en funcionamiento estaciones de "biogás". En países como Alemania y Austria se están alimentando las redes de gas natural con "biometano", una aplicación relativamente nueva al igual que el uso del mismo en las pilas de combustible tanto en Europa como en EEUU.

La producción integrada de los biocombustibles (biogás, bioetanol y biodiesel), junto con los alimentos y materias primas para la industria, se conoce como el concepto de biorrefinería, esta es un área de investigación importante en la actualidad, donde el biogás proporciona energía de proceso para la producción de biocombustibles líquidos y utiliza los efluentes de otros procesos como materia prima para los reactores anaerobios. La biorrefinería tiene como ventajas la eficiencia energética, económica y la reducción de gases de efecto invernadero.

Se ha estimado el potencial de la biomasa existente en nuestro planeta y la conclusión expuesta por diferentes expertos y científicos en base a diferentes escenarios y supuestos, se ha llegado a una conclusión en que se puede aumentar de los 72 millones de toneladas (Mtep) en 2004 a 220 (Mtep) en el año 2020. El mayor potencial se encuentra en la biomasa procedente de la agricultura, ya que según AEBIOM, hasta 20 a 40 millones de hectáreas (Mha) de tierra se pueden utilizar para la producción de energía en la Unión Europea, sin afectar al suministro de alimentos. El Instituto Alemán de Estados Energía y Medio Ambiente estima que el potencial de biogás en Europa es lo suficientemente alto como para que sea factible para reemplazar el consumo total de gas natural, por inyección de biogás mejorado (biometano) en la red de gas natural existente. La estimación del potencial de biogás en Europa depende de diferentes factores, que se incluyen en los cálculos, como la disponibilidad de tierras agrícolas que no afecten a la producción de alimentos, la productividad de los cultivos energéticos, el rendimiento de metano de sustratos de materia prima y la eficiencia energética de uso final de biogás. [Teodorita, 2008]

En términos de energía primaria de biogás, nuestro país ocupaba en 2008 el séptimo lugar en la producción en Europa con 203,2 ktep/año. Casi el 78% del biogás procede de vertedero mientras que sólo un 13% procede de unidades descentralizadas de digestor agrícola, unidades de metanización de desechos municipales sólidos o unidades centralizadas de codigestión. [Pascual, 2011]

El caso de Dinamarca es uno de los países pioneros en la producción de biogás a partir de residuos agroindustriales y mediante plantas de biogás centralizadas basadas en la digestión anaerobia de residuos ganaderos e industriales. Según un estudio realizado en 2008, la producción de biogás en unidades de energía primaria de Dinamarca es de 93,8 ktep/año. El biogás se aprovecha en motores de cogeneración de electricidad y calor propios o bien se entrega a empresas del sector energético que explotan el recurso. El calor puede ser empleado en la granja (plantas individuales) o en redes de (calor distribuido) district heating cerca de municipios. Dinamarca apuesta por la inyección del biogás en la red de gas natural antes que de su uso en vehículos.

En el caso de Alemania ocupa el primer lugar del ranking europeo, gracias al enorme desarrollo que ha experimentado en los últimos años las plantas de tratamiento de residuos ganaderos en digestión anaerobia con cultivos energéticos. La producción de biogás en unidades de energía primaria en Alemania ha sido de 3.675,8 ktep/año para el año 2008. [Pascual, 2011]

3.2 Fermentación anaerobia

La fermentación anaerobia es un proceso a través del cual la materia orgánica se degrada en productos gaseosos, CH₄ y CO₂ por la intervención de determinados tipos de bacterias. Alrededor del 90% de la energía de los productos es retenida en el metano producido. [Melgar, 2013]

La fermentación anaerobia es una vía de aprovechamiento directo de los desechos de animales, residuos sólidos urbanos, aguas residuales y otras sustancias orgánicas, generalmente con un alto contenido de humedad (por encima del 50%) mediante su conversión en un gas con un contenido aproximado de metano (CH₄) de 65%, dióxido de carbono (CO₂) de 34%, sulfuro de hidrógeno (SH₂) de 1% y otros. [Melgar, 2013]. Como norma se puede expresar con los siguientes valores el valor poder calorífico por unidad de volumen es de 21 MJ / Nm³, la densidad es de 1,22 kg / Nm³ y la masa es similar a la del aire (1,29 kg / Nm³). [Teodorita, 2008]

La cantidad de metano que se puede obtener de un determinado sustrato (biomasa usada para la producción de biogás), depende fundamentalmente de la cantidad de sólidos volátiles contenidos en él y del tipo de sustrato. En la Tabla 3 se muestra las principales características del sustrato, en la Tabla 4 se representa a modo de resumen la composición del biogás. [Melgar, 2013].

Especie	Peso Vivo	Kg Estiercol/día	l gas/kg S.V.	% CH ₄
Cerdos	50	4,5 - 6	340 - 550	65 - 70
Vacunos	400	25 - 40	90 - 310	65
Equinos	450	12 - 16	200 - 300	65
Ovinos	45	2,5	90 - 310	63
Aves	1,5	0,06	310 - 620	60
Caprinos	40	1,5	110 - 290	-

Tabla 4: Caracterización del sustrato [Melgar 2013]

Especie	Símbolo Químico	Contenido (%vol)
Metano	CH ₄	50 - 75
Dióxido de carbono	CO ₂	25 - 45
Vapor de agua	H ₂ O	2 (20°C) – 7 (40°C)
Oxígeno	O ₂	<2
Nitrógeno	N ₂	<2
Amoníaco	NH ₃	<1
Hidrógeno	H ₂	<1
Sulfuro de Hidrógeno	H ₂ S	<1

Tabla 5: Composición del biogás [Arroyo, 2013]

La actividad metabólica involucrada en el proceso metanogénico se ve afectada por diversos factores, más importantes que afectan al proceso son los siguientes: **Tipo de biomasa y microorganismos, Temperatura de la biomasa, Tiempo de retención hidráulico, Nivel de acidez (pH), Relación Carbono/Nitrógeno, Concentración de la biomasa en el reactor, Presencia de compuestos inhibidores del proceso (Tóxicos), Actividad específica, Potencial Redox, Concentración de ácidos grasos volátiles.** [Omil, 2003]

En las Ilustraciones 5 y 6 se muestran los balances de materia y energía para un reactor anaeróbico.

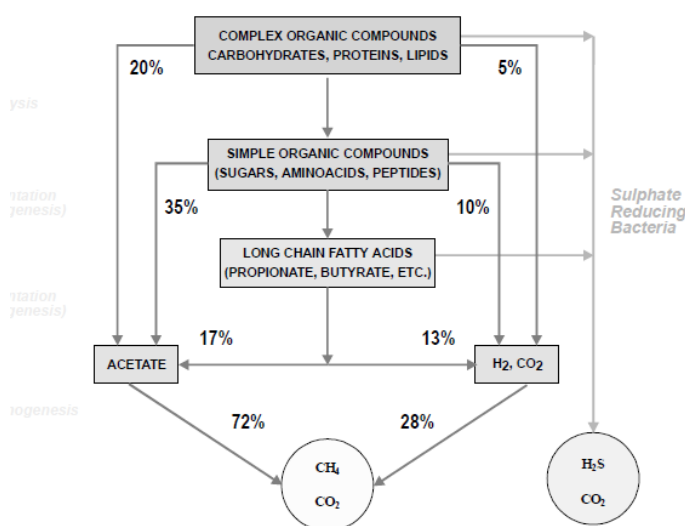


Ilustración 5: Tratamiento anaeróbico con sulfatos [Omil, 2003]

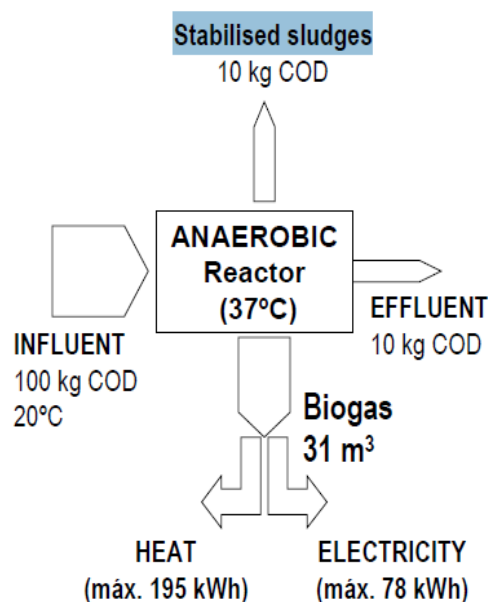


Ilustración 6: Balances de un reactor anaeróbico [Omil, 2003]

3.3 Aplicaciones del biogás

El uso de la energía de biogás se maximiza cuando se convierte en electricidad, a través de un motor de gas que hace girar un generador (generalmente a 1500 rpm), haciendo un proceso ecológico y eficiente desde el punto de vista energético.

El biogás se usa de diferentes formas como fuente de energía, dependiendo de la naturaleza de la fuente de biogás y de la demanda local. Generalmente, el biogás se puede utilizar para la producción de calor por la combustión directa, la producción de electricidad mediante pilas de combustible o microturbinas, cogeneración (calor y electricidad), como combustible para vehículos o inyectarse a la red pública de gas natural. En la Ilustración 7 se muestran los principales usos del biogás como fuente de energía.

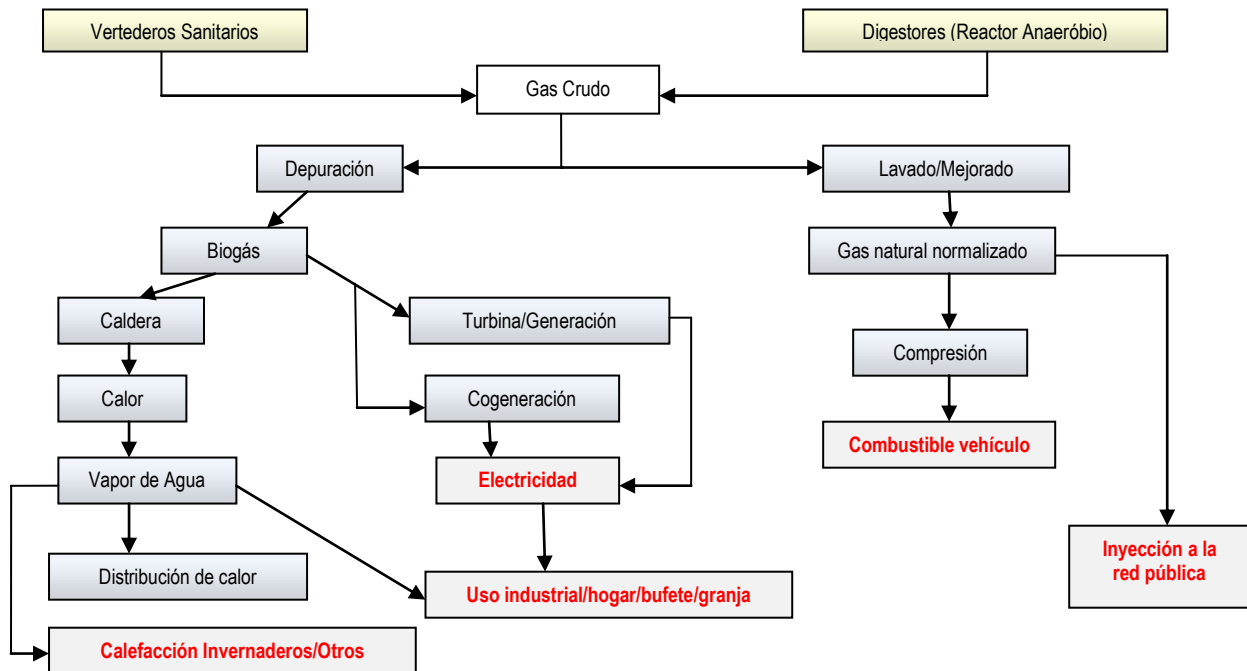


Ilustración 7: Aplicaciones del Biogás

3.3.1 Combustión directa del biogás

La forma más sencilla en que se utiliza el biogás es la combustión directa en calderas o quemadores, producido por pequeños digestores. El biogás puede ser quemado para producir calor en las instalaciones, o puede ser transportado por gasoductos a los usuarios finales. Para la calefacción de biogás no necesita ser mejorado y el nivel de contaminación no restringe el uso del gas tanto como en el caso de otras aplicaciones. Sin embargo, el biogás tiene que someterse a condensación y eliminación de partículas, compresión, enfriamiento y secado. [Teodorita, 2008]

3.3.2 Generación de calor y electricidad con biogás. Cogeneración

Se define como cogeneración la producción conjunta de energía térmica útil y energía eléctrica y/o mecánica, tanto para uso propio como para la venta total o parcial de las mismas, a partir de un mismo combustible. La cogeneración es una aplicación para la producción de electricidad y calor desde los digestores. Incluso se podría considerar un sistema de energía total o trigeneración que en la que generalmente se usa una turbina de gas para generar energía eléctrica y un sistema de refrigeración por compresión mecánica para la generación de enfriamiento, además de aprovechar el calor generado en la turbina para calor de proceso. [Vázquez, 2013]

La mayoría de los motores o turbinas de gas tienen límites máximos para el contenido de sulfuro de hidrógeno, hidrocarburos halogenados y siloxanos en el biogás, por lo que debe existir una pequeña depuración del biogás. Una planta de cogeneración de energía basada en motor tiene una eficiencia de hasta el 90% y produce 35% de electricidad y el 65% de calor. [Teodorita, 2008]

Los sistemas de cogeneración basados en motores alternativos tienen las siguientes características: [Vázquez, 2013]

- **Baja relación calor/electricidad (0,6/1,2).**
- **Adaptación a rápidas variaciones de potencia.**
- **Gama de potencia entre 15 y 25.000 kW.**
- **Baja sensibilidad a las condiciones atmosféricas.**
- **Producción de agua caliente o vapor a baja presión.**
- **Baja presión de suministro de gas de alimentación al motor.**
- **Variedad de combustibles: fuelóleo, gas natural, propano, biogás.**
- **Los costes de mantenimiento son entre un 10 y un 30% más elevados en los motores diesel tradicionales que en los motores a gas de la misma potencia.**
- **El gas natural por su mayor capacidad antidetonante (índice de octano) permite mayores relaciones de compresión de hasta 12- 13 en lugar de 9.**
- **Un MEP gasolina tiene un rendimiento alrededor del 25% mientras que con gas natural se alcanzan valores del 32%.**

La creciente disponibilidad de gas natural, a precios convenientes, y las ventajas de un combustible que no obliga a parques de almacenamiento en las fábricas y cuyo nivel de contaminación es nulo, ha ido extendiendo el uso de motores alternativos de gas natural en los sistemas de cogeneración.

Los tipos más comunes de las plantas de cogeneración son las centrales térmicas con motores de combustión interna alternativos que están acoplados a un generador. Los generadores por lo general tienen una velocidad constante de rotación de 1500 rpm (revoluciones por minuto) con el fin de ser compatible con la frecuencia de red. Los motores pueden ser de gas-MEP, gas-MEC o motor diesel de gas natural, con diferencias en el sistema de inicio de la combustión y en la relación de compresión. Existen otras alternativas a las centrales mencionadas, como son las basadas en microturbinas de gas, motores Stirling y pilas de combustible, todos ellos sometidos a las tecnologías importantes pasos en el desarrollo durante los últimos años. Se hará una pequeña mención en los siguientes apartados. [Teodorita, 2008]

3.3.2.1 Motor de Gas-Otto (MEP)

Los motores de Gas Otto se desarrollan específicamente para el uso de biogás según el principio Otto. Son motores de combustión pobre y se hacen funcionar con exceso de aire, con el fin de minimizar las emisiones de monóxido carbono. Esto conduce a un menor consumo de gas y la reducción de rendimiento del motor, compensado mediante el uso de un turbocompresor en el escape.

Motores de gas-Otto requieren biogás como mínimo 45% de contenido de metano. Los motores más pequeños, hasta 100 kWel suelen ser motores Otto. [Teodorita, 2008]

3.3.2.2 Motor de Gas-Diesel (MEC)

Cuando se está hablando de un motor diesel de gas natural o biogás, se habla de un motor, que constructivamente deriva del diesel, pero que tiene un diferente sistema de ignición, utilizándose dos procedimientos: [Vázquez, 2013]

- **Compresión de la mezcla aire-combustible e ignición por bujía.**
- **Compresión de la mezcla aire-combustible e ignición de una pequeña cantidad de gasóleo que provocará la combustión del resto de la mezcla.**

El biogás se mezcla en un mezclador de gas, junto con el aire. Esta mezcla pasa a través de un sistema de inyección en la cámara de combustión donde es encendido por el combustible de encendido inyectado. Son motores que funcionan con exceso de aire elevado, además pueden funcionar en caso de interrupción de suministro de biogás, con diesel o biodiesel sin ningún problema.

La ventaja de ignición renovable es que son libres de azufre y emiten menos monóxido de carbono. Sin embargo, los biocombustibles producen, mayor desgaste de filtros, obstrucción del chorro y una menor viscosidad del aceite vegetal además de que liberan óxido nitroso. [Teodorita, 2008]

3.3.2.3 Motor Stirling

El motor Stirling funciona sin combustión interna, se basa en el principio de los cambios de volumen que se producen en los gases debido a los cambios de temperatura. Los pistones del motor se mueven por la expansión de gas debido a la inyección de calor desde una fuente de energía externa.

La eficiencia eléctrica del motor Stirling es de 24-28%, que es inferior a los motores gas-Otto. Las temperaturas de escape son entre 250-300 °C. La capacidad de los motores Stirling está por debajo de 50 kWel. [Teodorita, 2008]

3.3.3 Microturbinas de biogás

Las microturbinas son turbinas de pequeño tamaño (25-500 kW) que permiten obtener calor y electricidad (cogeneración) para aplicaciones industriales y comerciales, con eficiencias térmicas en el rango del 50-60 % y eléctricas entre el 15-30 %. Se trata de una tecnología emergente y las más desarrolladas son las microturbinas de potencia inferior a 200 kW.

Las microturbinas de gas tienen una aplicación directa en la Generación Distribuida, bien como, elementos independientes de generación, o bien como integrantes de instalaciones híbridas con pilas de combustibles, micro-cogeneración o, en el terreno del transporte, vehículos eléctricos híbridos.

En las microturbinas de biogás, el aire se comprime en una cámara de combustión a alta presión y se mezcla con biogás. La mezcla de aire-biogás se quema causando el aumento de la temperatura y la expansión de la mezcla de gas, así los gases calientes que se liberan fluyen a través de una turbina, que está conectada a un generador de electricidad. [Teodorita, 2008] El coste de las microturbinas de biogás es alto en relación con otros sistemas de generación de energía. [Vázquez, 2013]

3.3.4 Pilas de combustible

Las pilas de combustible son dispositivos electroquímicos que convierten la energía química de una reacción directamente en energía eléctrica, sin estar limitados por esta eficiencia máxima de Carnot aplicable a los sistemas de generación eléctrica basados en ciclos termodinámicos con un Foco Frío a temperatura T_f , y un Foco Caliente a temperatura T_c . Este límite es el rendimiento máximo en la obtención de electricidad, y es: $\eta_{\text{máx}} = 1 - T_f/T_c$ (con T en Kelvin).

En el caso de que el combustible sea rico en hidrógeno, se dice que las pilas de combustible son dispositivos electroquímicos que transforman la energía química de un combustible rico en hidrógeno, en electricidad, agua y calor.

En una pila de combustible típica, el combustible gaseoso (biogás) se alimenta de forma continua al ánodo (el electrodo negativo) y un oxidante (es decir, el oxígeno del aire) se alimenta continuamente al cátodo (electrodo positivo), se produce una reacción electroquímica que tiene lugar en los electrodos, produciendo corriente eléctrica. [Vázquez, 2013]

Sus aplicaciones son diversas, entre ellas cabe destacar las siguientes: generación eléctrica, cogeneración, vehículos eléctricos, sistemas auxiliares de energía, sistemas de apoyo a la red eléctrica,... Poseen como ventajas: **Rendimiento elevado, Cero emisiones contaminantes, Sin contaminación acústica, Instalación modular, No tiene partes móviles.** También presentan algunos inconvenientes como son: **Coste elevado, Sensible a contaminantes en el combustible, Tecnología emergente.** [Rodríguez, 2013]

Se clasifican por el tipo de electrolito empleado y por la temperatura de trabajo. En la Tabla 7 los diferentes tipos de pilas existentes (las comercializadas), en función de las dos criterios expuestos anteriormente, así como las características más importantes de cada una de ellas. **AFC:** alcalinas.

PEMFC: de membrana polimérica. **DMFC:** conversión directa de metanol. **PAFC:** ácido fosfórico. **MCFC:** carbonato fundido. **SOFC:** óxido sólido. [Vázquez, 2013]

Los costes de inversión de todas las células de combustible de biogás son mucho más altos que para centrales impulsadas por MCIA, que asciende a unos 12 000 €/kW. [Teodorita, 2008]

3.4 **Biometano obtenido a partir de la mejora del biogás**

El biogás puede ser distribuido a través de las redes de gas natural existentes y utilizarlo para el mismo propósito como el gas natural o que puede ser comprimido y se utiliza como combustible para vehículos. Antes de su inyección en la red de gas natural o para su utilización como combustible para vehículos, el biogás debe someterse a un proceso de mejora, donde se eliminan todos los contaminantes, así como dióxido de carbono y el contenido de metano debe incrementarse desde el habitual 50-75% a más del 95%. El biogás mejorado se denomina **biometano**.

Existen varias tecnologías que se pueden aplicar para la eliminación de los contaminantes y para el aumento del contenido de metano del biogás. La eliminación de dióxido de carbono se lleva a cabo con el fin de alcanzar el índice de Wobbe requerido de gas, además al eliminar el dióxido de carbono de biogás, puede arrastrar pequeñas cantidades de metano CH₄. El metano tiene un efecto invernadero 23 veces más fuerte que el CO₂, por eso es importante minimizar las pérdidas de metano, tanto por razones económicas y ambientales. Los métodos más comunes de eliminación de dióxido de carbono a partir de biogás son de absorción (lavado con agua, o lavado de disolvente orgánico) y adsorción (adsorción oscilante de presión, PSA). La parte de eliminación de CO₂ es la que más influye en el coste económico. [Teodorita, 2008]

3.4.1 **Inyección del biometano en la red de distribución de gas natural**

En muchos países de la UE, el acceso a la red de gas está garantizado para todos los proveedores de biogás. Una ventaja importante es que la red conecta el lugar de producción de biometano, que es por lo general en las zonas rurales con las zonas más densamente pobladas. Esto permite que el gas llegue a nuevos clientes.

Países como Suecia, Suiza, Alemania y Francia tienen estándares para la inyección de biogás en la red de gas natural. Las normas, la prescripción de los límites para los componentes como el azufre, oxígeno, partículas y el punto de rocío del agua, tienen la finalidad de evitar contaminación de la red de gas o de los usuarios finales. Los índices de calidad para el biometano (el principal el de Wobbe), son en la mayoría de los casos fácilmente alcanzables a través de los procesos de mejora/purificación actuales. Las principales barreras para la inyección de biometano son los altos costes de mejora y conexión a la red. [Teodorita, 2008]

La planta de biogás Söderåsens Bioenergi AB (Suecia) lleva en funcionamiento desde 2006, procesa fundamentalmente residuos de industrias alimentarias y cuenta con un sistema de depuración e inyección del biogás a la red de gas natural. Genera 4 millones de m³ de biogás al año, con un 65-70% de metano. En total, la planta produce entre 21 y 24 GWh de biogás depurado por año, el cual es equivalente a cerca de 2,5 millones de litros de gasolina. [Pascual, 2011]

El caso de Dinamarca apuesta por la inyección del biogás en la red de gas natural antes que de su uso en vehículos. Entre sus líneas de investigación destacan las siguientes: [Pascual, 2011]

- **Proyecto demostración: BioTrans – Upgrading biogas for transportation purposes. (2008- 2010)** El proyecto analiza y estudia los casos en los que resulta rentable e interesante para la sociedad depurar el biogás de CO₂ y utilizarlo como combustible en vehículos o para inyección en la red de gas.
- **Proyecto demostración: Biogas to the grid. (2008-2009).** Análisis de barreras económicas, técnicas y legales para la inyección de biogás (tras limpieza y mejora) en la red de gas natural.

- **Producción energética a partir de biomasa marina (2008-2011).** Aprovechamiento de la biomasa marina (algas) para producción de bioetanol y biogás a través de procesos eficientes. Captura de CO₂, conversión de la biomasa en bioetanol y producción de biogás con los residuos de la producción de bioetanol.

En el caso de Alemania, tiene por objetivo es sustituir un 10% del consumo del gas natural por biometano para el año 2030. Entre sus líneas de investigación destacan las siguientes: [Pascual, 2011]

- **Mejora de la calidad del biogás (depuración del biogás).**
- **Aprovechamiento de algas para la producción de biogás**
- **Inyección del biogás en la red de gas natural:** Análisis y evaluación de las distintas posibilidades para inyección en la red de gas natural.
- **Implementación del concepto de Biorrefinería:** El objetivo del proyecto consiste en desarrollar bioprocesos integrados para convertir glicerina a partir de la producción de biodiésel en biogás y obtener además dos productos con valor añadido 1,3-propanediol (PDO) y un producto fertilizante.

3.4.2 Biogás como combustible para vehículos

La utilización de biogás en el sector del transporte es una tecnología con un gran potencial y con beneficios socio-económicos importantes. El número de vehículos particulares, vehículos de transporte público y camiones impulsados por biogás (biometano) es cada vez mayor ya que se puede utilizar como combustible de igual forma y por los mismos vehículos como el gas natural.

Los vehículos se equipan con un tanque de gas comprimido, en el compartimiento de equipaje, y un sistema de suministro de gas, además del sistema de combustible fósil, aunque también hay vehículos especialmente contruidos para biogás, que están optimizados para una mayor eficacia y colocación más conveniente de los cilindros de gas, sin perder espacio para el equipaje como por ejemplo el Fiat Punto 1.4 Natural Power, que sitúa los cilindros debajo del piso (parte exterior del chasis). El biogás se almacena a 200 a 250 bares, en recipientes a presión, de acero, o aleaciones de aluminio. Se puede almacenar de forma licuada (GNL, almacenado a -162°C y 1 bar de presión), en este caso es necesario regasificar el combustible antes de introducirlo en el motor.

Los vehículos pesados se pueden convertir para funcionar con gas metano sólo, pero en algunos casos también se utilizan motores de combustible dual que hacen uso de un sistema de inyección diesel y el gas es encendido por la inyección de una pequeña cantidad de diesel. Las emisiones globales de dióxido de carbono, de partículas, de NO_x y de hidrocarburos sin quemar, se reducen incluso al ser comparados con motores diesel muy modernos, equipados con filtros de partículas.

3.5 Infraestructuras para la distribución del biometano

El biometano o biogás mejorado debe ser inyectado en las condiciones de distribución de la red de gas natural que poseen los diferentes países, de hecho existe una serie de normativas tanto en el ámbito europeo. Así el tratamiento de mejora del biogás a biometano suele incluir en primer lugar un filtrado de partículas y una etapa de deshumidificación y desulfurización. Para obtener el biometano se separa el CO₂ pudiendo emplear distintas tecnologías como el lavado con agua a presión, PSA (Pressure Swing Adsorption), lavado con selexol, separación con membranas, proceso a baja temperatura, etc.

La inyección del biometano en la red es una solución ideal para resolver el problema de la distancia entre el punto de generación del gas y el de su uso.

A nivel europeo la Directiva 2009/28/CE también dispone en materia de acceso a las redes y funcionamiento de las mismas, aspectos de vital importancia para el desarrollo del biogás, como

proporcionar facilidades para la conexión a red eléctrica y la inyección en redes de gas natural, incluyendo: [Pascual, 2011]

- **Posibilidad de modificar las infraestructuras existentes de redes de gas para facilitar la integración del gas procedente de fuentes renovables (artículo 16.9).**
- **Posibilidad de que los Estados Miembros exijan a los operadores de sistemas de transporte y distribución que publiquen normas técnicas en particular por lo que respecta a las normas de conexión a la red (requisitos en materia de calidad, olor y presión del gas) (artículo 16, epígrafe 10).**

La Directiva 2009/73/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, sobre normas comunes para el mercado interior del gas natural, que ha sido transpuesta mediante el Real Decreto-ley 13/2012 de 30 de marzo. Por ello las normas establecidas en esta Directiva en relación el gas natural, también son aplicables al biogás y al gas obtenido a partir de la biomasa. Destaca que los estados miembros deben garantizar un acceso no discriminatorio a la red de gas para el biogás, el obtenido a partir de la biomasa u otros tipos de gas, con la condición de que dicho acceso sea permanentemente compatible con las normas técnicas pertinentes y las exigencias de seguridad. [Prieto, 2013]

En la Tabla 6 se muestran las propiedades del gas natural en los puntos de acceso a la red de gas que debe cumplir el biogás para su distribución a través de las redes de transporte. El gas entregado al consumidor no deberá contener partículas de polvo u otras impurezas en cantidades superiores a las habituales y que pudieran dañar las instalaciones de los consumidores. [Prieto, 2013]

Propiedad (*)	Unidad	Mínimo	Máximo
Índice de Wobbe.	kWh/m ³ .	13,368	16,016
PCS.	kWh/m ³ .	10,230	13,23
D.	m ³ /m ³ .	0,555	0,700
S Total.	mg/m ³ .	-	50
H ₂ S + COS (como S).	mg/m ³ .	-	15
RSH (como S).	mg/m ³ .	-	17
O ₂ .	mol %.	-	[0.01]
CO ₂ .	mol %.	-	2,5
H ₂ O (punto de rocío).	°C at 70 bar (a).	-	+ 2
HC (punto de rocío).	°C at 1-70 bar (a).	-	+ 5

Tabla 6: Especificaciones de calidad del gas natural en los puntos de entrada del sistema gasista. [Prieto 2013]

El transporte de gas desde los yacimientos o plantas de regasificación hasta las redes de grandes red de transporte distribución o los clientes posee las siguientes características: [Prieto, 2013]

- **Se construyen para transporte a largas distancias**, hasta varios miles de km.
- **Se transporta a altas presiones (60-80 bar)** que incrementan la capacidad de transporte.
- **Las estaciones de compresión bombean el gas y también lo usan como combustible.**
- **Dispone de estaciones de regulación y medida** para disminuir la presión del gas cuando el gas se aproxima a los puntos de suministro.
- **Es común que los gasoductos de transporte crucen más de un país** y que deban ser gestionados de forma coordinada por más de un transportista.

La distribución es el transporte del gas natural por gasoducto hasta los consumidores finales normalmente desde la red de transporte, y presenta las siguientes características: (Ilustración 8) [Prieto, 2013]

- **Normalmente por debajo de 20 bares:** Distribución a bajas presiones en zonas urbanas.
- **Altas presiones para consumidores industriales.**
- **Redes de media y corta distancia:** Suele incluir varias etapas de regulación y medida.

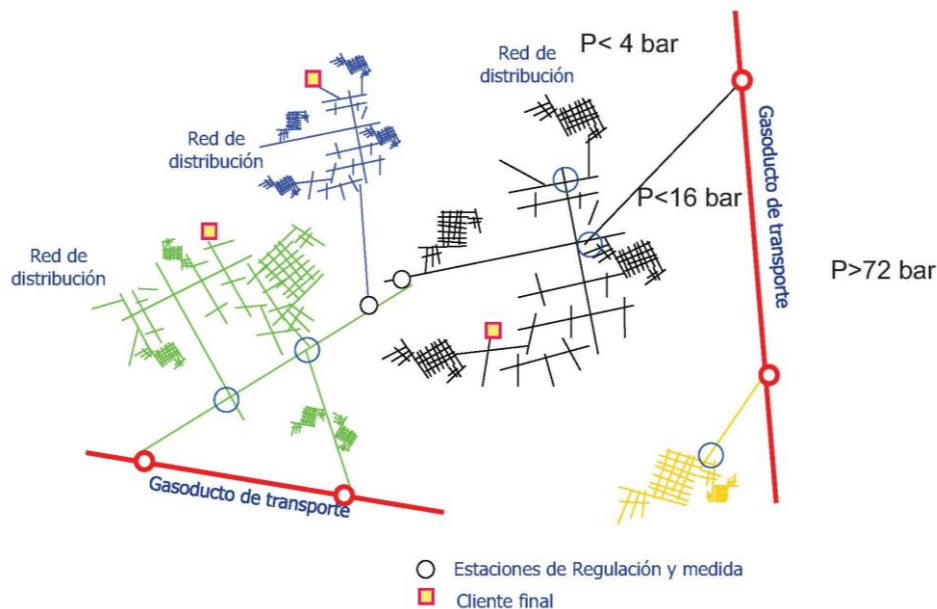


Ilustración 8: Distribución de la Red de Gas en España

Además el acceso a la red de transporte permitiría el almacenaje del biometano en los propios medios en los que lo hace el gas natural que se citan a continuación: [Prieto, 2013]

- **Stock en gaseoducto:** El stock de gasoducto es pequeño, sirve sobre todo para el balance diario del sistema, proporciona flexibilidad a los usuarios, y ya que todos usan el sistema de transporte es un buen sitio para hacer trading.
- **Almacenamiento en las plantas de regasificación (Gas Natural) o producción (Biogás).** Es un buen almacenamiento operativo, dando flexibilidad mensual/semanal a la operación de los usuarios y sirviendo de cobertura ante variaciones de la demanda. Sirve para que el gestor del sistema pueda hacer frente a problemas sobrevenidos de aprovisionamiento con rapidez.
- **Almacenamiento Subterráneo:** Es el de mayor capacidad, sirve para amortiguar la variación estacional de la demanda, si bien no es de rápida reacción (puede llevar más de 12 h. revertir el ciclo inyección/extracción). Estos pueden ser de los siguientes tipos: Yacimientos depletados, Acuíferos, Cavidades salinas, Minas

4 Comportamiento de los vehículos con biogás

En este apartado se describirán las principales características de los vehículos con biogás, que convenientemente tratado, cumple los requisitos que exigen las distintas normativas al gas natural empleado en automoción y su comportamiento en los motores es equivalente al propio del gas natural.

El índice de Wobbe es importante porque se basa en que es proporcional la cantidad de energía calorífica del gas que pasa a través de un orificio, en condiciones subsónicas, debido a los gradientes de presión. Partiendo de la base de que la mayor parte de los motores de combustión de gas se basan en el flujo a través de orificios, cualquier variación en el índice de Wobbe del combustible implica una variación proporcional en el flujo de energía y como consecuencia en la relación aire/combustible. Se puede afirmar que dos gases son intercambiables cuando tienen el mismo índice de Wobbe.

En los MCIAs con sonda lambda λ , que poseen regulación y control en lazo cerrado, pueden ser admitidas y compensadas pequeñas variaciones del índice de Wobbe, sin embargo los motores que son alimentados por mezclas pobres y no disponen de ese control una disminución del índice de Wobbe produce una pérdida importante de potencia, y si se produce un aumento de este índice puede producir sobrecalentamientos con el consecuente deterioro del motor por estrés térmico.

En el caso del gas natural el índice de Wobbe es $50,66 \text{ MJ/m}^3$, la adición de hidrocarburos de mayor peso molecular, incrementan el valor del índice pudiendo disminuirlo con la adición de gases inertes. Los límites en España (coincidentes con la EN-437) pertenecen al intervalo $[45,7-54,7] \text{ MJ/m}^3$, estos límites son de aplicación al biogás. [Castaño, 2010]

4.1 Introducción

El biogás puede usarse como una opción alternativa al gas natural cuando cumpla las especificaciones y requisitos del combustible fósil que sustituye. Todos los contaminantes están limitados (normativas), eliminación de CO_2 , O_2 , N_2 y el resto de compuestos gaseosos diferentes del metano, como H_2S , HF y otros causantes de corrosión ácida en el motor, que pueden ser causa de desgaste, abrasión o formación de depósitos. El biogás puede ser empleado en la industria de la automoción como un combustible que alimente a un MCIa o bien mediante procesos de procesamiento en una subestación de suministro de hidrógeno o en el propio vehículo para la obtención de hidrógeno como combustible en una pila de combustible, surtido en una gasolinera más o menos convencional. La distribución de los componentes que componen un vehículo con pila de combustible es similar a la de un vehículo híbrido en serie, pero dispone de dispositivos de procesamiento a bordo. El sistema de gestión es más costoso y complejo, además posee una autonomía comparable a los combustibles convencionales. Sin embargo, presentan como inconvenientes una menor eficiencia energética, menor confort ya que se reduce el habitáculo. En la ilustración 9 se muestra la configuración de un vehículo con pila combustible, un ejemplo comercial es el fabricante Honda con su modelo FCX Clarity Concept. [Sanchez, 2013]

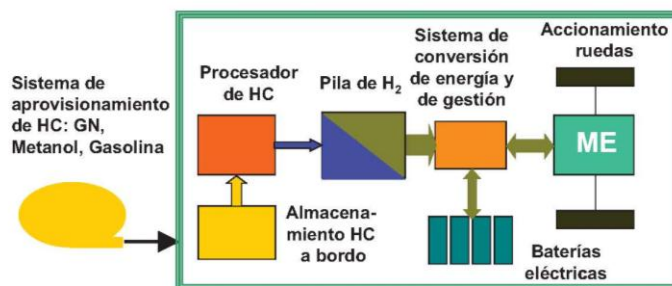


Ilustración 9: Vehículo con pila de combustible alimentado de HC líquido y procesado a bordo. [Tinaut, 2011a]

El biometano procedente del biogás es un combustible totalmente consolidado como la alternativa en lo relativo a emisiones de escape y sonoras para los vehículos de uso urbano. En Automoción puede encontrarse de dos formas análogas a los vehículos de gas de forma comprimida, en recipientes a presión de acero o aleaciones de aluminio el biogás se almacena a 200 a 250 bares, y de forma licuada (almacenado a -162°C y 1 bar de presión).

El biogás licuado es la forma en que consigue una mayor densidad ofreciendo una mayor autonomía al vehículo y no requiere depósitos preparados para resistir altas presiones del tipo cilindro de acero, pero tienen que estar equipados con un importante aislamiento térmico para reducir la vaporización incontrolada del GNL. Tiene mayor autonomía que el biogás almacenado de forma comprimida, pero presentan una importante limitación relacionada con el tiempo máximo de parada de los vehículos, que no puede ser superior a algunos días sin que se produzca una vaporización que obligue a despresurizar parcialmente el depósito.

El biometano en forma comprimida a 200 bar requiere que los vehículos estén equipados con depósitos reforzados para soportar estas presiones. Los vehículos deben soportar el incremento de peso de los depósitos de forma cilíndrica, son de acero o aleaciones de aluminio y por lo tanto su peso es relativamente elevado; se está investigando una nueva generación de depósitos que reduce el espesor de acero o aleaciones de aluminio mientras se refuerzan exteriormente con fibra de vidrio continua impregnada de resinas de poliéster, se consiguen así reducciones de peso del 40%. Es una tecnología madura y la forma más utilizada de aprovisionamiento de gas natural para vehículos, por lo que el presente trabajo se centrará en dicha tecnología.

4.2 *Parámetros constructivos en vehículos con biogás*

El uso de gas natural como combustible en motores alternativos tiene sus ventajas relacionadas con el mantenimiento preventivo, como la mayor duración de los lubricantes, las bujías, o la duración del motor.

Sin embargo, el mejor uso del biogás como combustible depende de la adaptación del motor para esta fuente de energía, que puede ir desde una simple sustitución de combustible hasta el diseño completo del motor optimizado para el uso del gas natural y biogás, en cuyo caso se igualan y hasta mejoran las prestaciones que proporcionan los otros combustibles líquidos.

4.2.1 **Componentes de un vehículo de GNC o biogás**

Es esquema básico de un vehículo alimentado con biogás responde al de la Ilustración 10, que se describirán brevemente a continuación: [Moreno, 2011]

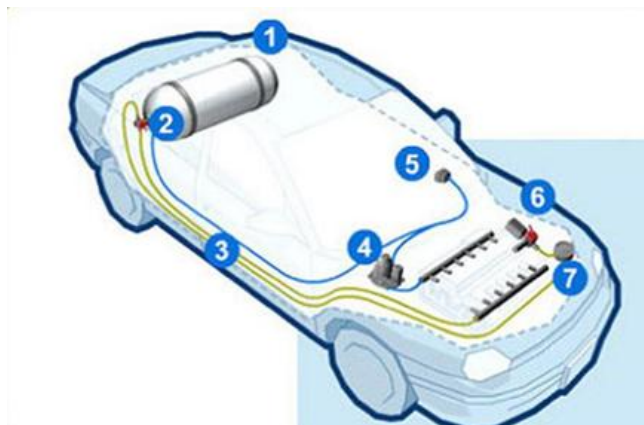


Ilustración 10: Esquema de vehículo con combustible gaseoso (GNC o biogás)

- **Depósito de gas a presión (1):** El depósito de combustible. Almacena el gas comprimido a 200 bar de presión máxima. Las más utilizadas son fabricadas en acero sin soldadura, aunque existen también fabricadas con materiales más ligeros. Cuando se trata de vehículos convertidos generalmente se ubican en el maletero y en vehículos nuevos suelen colocarse en la parte inferior consiguiendo no disminuir la capacidad del maletero. En los autobuses urbanos, estos depósitos van generalmente dispuestos en el techo y pueden llegar a suponer hasta el 15% del peso total del vehículo.
- **Válvula de botella (2):** Instalada en la salida de gas de la botella, es un dispositivo de seguridad para el exceso de presión y para la apertura y cierre rápido del circuito.
- **Tubos de conexión (3):** Tubos de alta presión que conectan la botella GNC con el motor.
- **Regulador de presión (4):** Su función es la de regular la presión para la alimentación de gas al motor. Este regulador dispone de múltiples etapas de regulación, a través de las cuales la presión de la botella es reducida a una presión constante.
- **Display indicador de nivel y selector de combustible (5):** Comanda eléctricamente el cambio de combustibles desde el interior del vehículo. Indica el nivel de GNC disponible en la botella de almacenamiento del vehículo.
- **Válvula de llenado (6):** Válvula de carga de GNC. Puede estar instalada dentro del compartimento motor o localizada en algún punto exterior del vehículo. El acoplamiento de carga está estandarizado en toda Europa, siendo el modelo NGV1 para los turismos y NGV2 para los vehículos pesados.
- **Manómetro (7):** Es un indicador de presión instalado entre la botella y el regulador de presión, con la finalidad de medir e indicar continuamente la presión del GNC almacenado en el depósito. El volumen del gas contenido en la botella guarda relación con la presión, por lo tanto, el manómetro envía una señal que indica en el panel del vehículo la cantidad de GNC.

4.2.2 Dispositivos para la formación de mezcla con combustibles gaseosos.

Para la introducción de gas en la cámara de combustión y formación de la mezcla, la instalación necesita dos elementos principales: Un regulador de presión para disminuir la presión desde el cilindro (depósito) de almacenamiento hasta la presión de trabajo y un mezclador de gas o inyector. [Castaño, 2010]. Los dispositivos para favorecer la mezcla y dosificarla de un gas combustible con el aire son fundamentalmente de dos tipos: mezcladores e inyectores.

- **Mezcladores:** Son dispositivos donde el gas se introduce en el seno del conducto por el que circula el aire admitido de forma análoga a los carburadores. Existe una galería anular con una serie de orificios radiales que la conectan con el Venturi para distribuir uniformemente al gas en el aire y a su vez está conectada con regulador de presión con el conducto que suministra el gas. La uniformidad de la mezcla se consigue por difusión en el tránsito hasta el cilindro. La presión de suministro suele ser baja (0,5 bar), siendo la curva de dosado similar a la de un carburador, dependiendo de los reglajes del mezclador y del ajuste de regulador que deben ser elegidos de acuerdo a las características del motor y condiciones de uso. Pueden usarse tanto en motores estacionarios (cogeneración y trigeneración) como en automoción, en este último caso es habitual disponer de un sistema de formación de mezcla con gasolina en paralelo. [Tinaut, 2011b]
- **Inyectores:** Los sistemas de inyección de gas son similares a los de gasolina aunque debe tenerse en cuenta la densidad de ambos fluidos, condicionando el gasto a inyectar. La presión de entrada en el inyector en el caso del gas natural y el biometano, es mayor a la del colector de admisión lo que hace el proceso independiente (gradiente positivo de

presión) y además supone un salto supercrítico a la entrada del inyector ya que la presión está en torno a 7 bar. Puede existir un único inyector o ser una inyección multipunto, con una rampa en común de alimentación en a los inyectores cerca de la válvula de admisión. Al igual que para los mezcladores suele tenerse un sistema de inyección paralelo de gasolina que se usa para el arranque de los motores y de apoyo en condiciones de máxima potencia ya que el gas natural y el biometano pueden proporcionar hasta un 10% menos de potencia que la gasolina. [Tinaut, 2011b]

4.2.3 Tipos de motores en la combustión con combustibles gaseosos.

El gas natural se utiliza habitualmente en motores de combustión interna alternativos de encendido provocado (MEP o motores tipo Otto). También se puede utilizar en motores de encendido por compresión (MEC); en estos casos suelen ser motores diesel transformados.

4.2.3.1 Motores de encendido provocado (MEP)

Los principales tipos de motorizaciones de encendido provocado en los vehículos alimentados con gas natural comprimido o con biometano son las siguientes:

- **Vehículos mono-fuel, monovalentes o dedicados:** Utilizan gas natural como único combustible. Se trata de motores MEP optimizados para trabajar con gas natural, asegura un rendimiento elevado y bajas emisiones debido a mayor relación de compresión y mayores potencias, que implica mayor temperatura en catalizador, para oxidación del metano.
- **Vehículos bi-fuel ó bivalentes:** Trabajan indistintamente con gas natural o gasolina. Son motores MEP que tienen dos depósitos, con dos sistemas diferentes de alimentación. La adaptación de los motores de gasolina a gas requiere únicamente una modificación en el avance del encendido. En este caso, los vehículos son reversibles, pueden recuperar su sistema inicial de alimentación. Son los más utilizados debido a que en nuestro país todavía existen pocas gasolinas con gas, por lo que da mayor autonomía. Casi todos los fabricantes de vehículos ligeros optan por esta opción.
- **Vehículos tri-fuel:** Motores flexibles que pueden utilizar gasolina, etanol, mezclas de ambos o gas natural.

Un vehículo mono-fuel correctamente optimizado y reglado puede extraer más potencia que uno con gasolina, debido a su elevado índice de octano que le permite utilizar una mayor relación de compresión. Además, con respecto a los vehículos bi-fuel, el vehículo dedicado no tiene que llevar dos combustibles, por lo que se incrementa la capacidad de carga y reduciendo el peso.

Las tecnologías que permiten la combustión estequiométrica (Sonda Lambda=1) reducen al nivel más bajo de emisiones si se compara con un motor diesel (85% de reducción en NO_x y del 100% en partículas), el mínimo consumo se da con mezclas pobres. [Castaño, 2010]

No obstante, por motivos de seguridad en el aprovisionamiento de combustible, la mayor parte de los vehículos ligeros de GNC o biometano disponibles actualmente en Europa son vehículos bi-fuel, empleando cada combustible de manera independiente.

Las mejores prestaciones para los vehículos propulsados por una configuración de motor bi-fuel, se consiguen en mezclas estequiométricas controladas electrónicamente, combinando EGR, turbocompresor e intercooler y catalizador de 3 vías. Al igual que en el caso de los vehículos dedicados, las combustiones de "mezcla pobre" consiguen mejores rendimientos que las estequiométricas, pero tienen mayores emisiones de óxidos nitrosos (NO_x) e hidrocarburos (HC). [Castaño, 2010]

4.2.3.2 Motores de encendido por compresión (MEC)

Los principales tipos de motores combustión interna alternativos de encendido por compresión (Diesel) en los vehículos, alimentados con gas natural comprimido o con biometano son las siguientes:

- **Vehículos dual-fuel o combustible dual:** Disponen de motores MEC que utilizan una mezcla de gas natural y gasóleo. El gasóleo, que actúa como iniciador del proceso de combustión, se inyecta directamente a la cámara de combustión. El gas natural se introduce en el aire de admisión mediante un carburador o un sistema de inyección. Cuando el vehículo está sin carga es alimentado exclusivamente por diesel, mientras que al variar los grados de carga y el régimen hacia valores mayores, disminuye la proporción de gasóleo varía entre el 5 y el 20%. En general se estima que este tipo de motores puede consumir del orden de 60-70% de gas natural y 30-40% de gasóleo. Esta tecnología permite adaptar fácilmente motores diésel con sólo reducir su relación de compresión y sin necesidad de adaptarle un sistema de ignición. Presenta el inconveniente de precisar el repostaje de dos tipos de carburantes.
- **Vehículos de inyección directa de alta presión (HPDI):** Se basa en un tipo de tecnología dual-fuel que inyecta simultáneamente gasóleo y gas natural a alta presión en la cámara de combustión. Lo normal es que el gasóleo (combustible piloto) se inyecte en cantidades pequeñas, siendo este el responsable de que se produzca la combustión. Tiene aplicación para vehículos pesados.
- **Vehículos de HCNG:** Se trata de una mezcla de gas natural y un 4 a 9% de hidrógeno. Las mezclas de HCNG menores del 50% presentan riesgos de pérdida de inflamabilidad similares a las del CNG y no hay problemas de fragilidad de los materiales. Este tipo de motores convenientemente optimizados, son capaces de trabajar con mezclas más pobres, (dosados reactivos <1) lo que implica una mejora en el rendimiento y reduciendo las emisiones y en especial las de óxidos nitrosos NO_x aunque pueden penalizar otras como los Hidrocarburos sin quemar [Mathai, 2012], [Castaño, 2010].

En el caso de sistemas dual-fuel, el comportamiento del vehículo depende de las condiciones de operación y del sistema de control empleado. En la actualidad se controlan electrónicamente y se inyecta el gas directamente en la cámara de combustión (HPDI), con lo que se mejoran los rendimientos y las emisiones.

4.3 Repostaje de los vehículos alimentados con biogás

Las estaciones de repostaje para los vehículos que utilizan gas natural son equivalentes a las estaciones de servicio tradicionales en las que repostan los vehículos que utilizan combustibles fósiles como la gasolina o el gasóleo. En ellas se comprime a una presión de 250 bar el gas obtenido de la red de distribución a un máximo de 16 bar o bien procedente de un depósito de GNL, se almacena en depósitos y se suministra a vehículos. (Ilustración11) [Moreno, 2011]

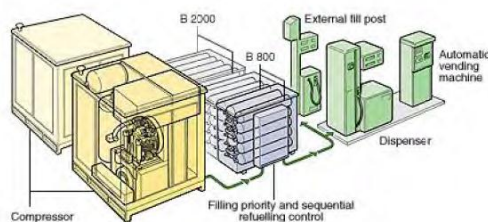


Ilustración 11: Estación de carga estándar. [Fuente Gas Natural Fenosa]

Las estaciones de llenado pueden ser públicas (de uso general) o privadas (de uso particular).

Normalmente a las empresas que poseen un gran número de vehículos a GNC, en especial vehículos pesados, les resulta más práctico y económico disponer de su propia estación de llenado. Se han desarrollado también instalaciones “caseras” para el llenado nocturno a partir de las tuberías de gas residencial, pero no está permitido en todos los países.

Por tanto, en función del número de vehículos, del grado de implicación de la compañía suministradora de gas y, sobre todo de todos los costes asociados, las instalaciones de repostaje pueden ser instaladas según distintas modalidades:

- **Instalación exclusiva para los vehículos de la propia flota**
- **Instalación para vehículos propios, con servicio al exterior**
- **Instalación pública de llenado**
- **Instalación repostaje casera**

4.3.1 Sistemas de recarga de vehículos alimentados a gas

Existen dos tecnologías[Moreno, 2011] para comprimir el gas natural a una presión de hasta 250 bar, conocidas como carga lenta y carga rápida en función del tiempo necesario para la operación.

4.3.1.1 Sistemas de recarga lenta

En este tipo de carga, el compresor suministra directamente el gas natural comprimido al depósito de combustible del vehículo sin ningún tipo de almacenamiento intermedio. Por medio de una conexión de llenado el vehículo se carga con el caudal propio del compresor en un tiempo determinado. El gas se comprime a la vez que se inyecta en el depósito. Normalmente para la carga de autobuses y pequeñas flotas se utiliza el sistema de carga lenta (o en parking) aprovechando el tiempo de aparcamiento nocturno de los vehículos. (6-8 horas)

Las ventajas de este sistema de carga son las siguientes:

- **Minimiza la inversión en equipos, sobre todo en el compresor y depósitos o esferas.**
- **La energía eléctrica requerida para la compresión y sus costes se minimizan. (Potencia del equipo, Discriminación horaria)**
- **El calentamiento del gas en el interior del depósito del vehículo es casi despreciable.**
- **No se requiere de personal cualificado.**
- **Una estación de compresión, considerada de carga lenta para repostar una flota de autobuses durante la noche, puede tener capacidad suficiente para considerarse de carga rápida para repostar vehículos ligeros durante el día.**

La principal desventaja de este sistema es el espacio requerido para la instalación de los surtidores.

4.3.1.2 Sistemas de recarga rápida

Por razones de logística, o autonomía de los vehículos ligeros puede requerirse el sistema de carga rápida, siendo el sistema idóneo si la intención es vender el gas natural comprimido a terceros.

El gas se almacena en un depósito antes de pasar por el surtidor al vehículo. Con este sistema se consigue repostar el depósito de un vehículo ligero en menos de 5 minutos. Usa compresores de mayor potencia que pueden actuar directamente sobre el vehículo o sobre unos depósitos de almacenamiento, los cuales se descargan sobre los vehículos.

Las ventajas principales de este sistema son:

- **Reducción del espacio de carga.**

- **Mayores posibilidades logísticas de los vehículos.**

Por el contrario, las principales desventajas de este sistema son:

- **La energía de compresión, así como las inversiones en la adquisición de compresores y de almacenamiento, son muy elevados.**
- **La carga rápida origina un aumento de temperatura dentro del depósito del vehículo, hecho que hace disminuir la cantidad de gas que se puede repostar.**

4.3.1.3 Componentes de un sistema de recarga

Los componentes básicos de una estación de servicio de para el suministro de gas natural comprimido o en su defecto biogás procedente de la red de distribución son: [Moreno, 2011]

- **Unidad de compresión:** Es la encargada de comprimir el gas de la red de distribución a una presión de 16 bares y llevar la presión a 250 bares, para posteriormente almacenarlo. El gas procedente de la red de suministro entra en el compresor a presión entre 10 y 20 bares, pasa por varias etapas de compresión y enfriado consecutivas hasta alcanzar los 250 bar. Suelen instalarse dos compresores en paralelo de igual potencia nominal como precaución en caso de una posible avería del que esté en funcionamiento. Se controlan los movimientos bruscos a través de un sensor de vibración.
- **Unidad de almacenamiento:** En las estaciones de servicio para llenado rápido, es indispensable la unidad de almacenamiento del gas. Su función es la de incrementar la velocidad del suministro de gas y su utilización ayuda a alargar la vida útil del compresor.
- **Unidad de suministro o distribución:** Es la encargada de proporcionar el combustible a los vehículos, está separada de la unidad de compresión y almacenamiento, y debe construirse sobre hormigón.
- **Unidad de control:** Es la encargada de administrar la corriente eléctrica y dirigir la estación de servicio mediante controles eléctricos y electrónicos que permiten a la estación operar en condiciones óptimas. Suele estar compuesta por una subestación eléctrica y un cuarto de regulación y control.

4.3.1.4 Seguridad en los sistemas de recarga

La instalación dispondrá de una los dispositivos de seguridad distribuidos por toda la estación de acuerdo a las indicaciones de la reglamentación vigente. El Real Decreto 2060/2008 de Aparatos a Presión y Real Decreto 2267/2004, por el que se aprueba el Reglamento de seguridad contra incendios en los establecimientos industriales [Moreno, 2011]

Básicamente se instalarán sistemas de emergencia en:

- **Seguridad en los compresores:** Se instalarán equipos para la protección y seguridad de las instalaciones tales como válvulas de seguridad, pulsadores, transmisores.
- **Seguridad en instalación almacenamiento:** Debe contener dispositivos de corte por exceso de flujo a salida del módulo de almacenamiento. Válvula de seguridad para cada módulo de almacenamiento sectorizable con capacidad de descarga de acuerdo a su capacidad.
- **Seguridad en instalación de llenado:** Debe contener línea de venteo de gas, dispositivos de regulación y control, así como sistemas actuadores.
- **Seguridad de detección de fugas de gas y de incendio en la instalación**
- **Red de emergencia:** La instalación dispondrá de una red de pulsadores de emergencia distribuidos por toda la estación del tipo seta y del tipo enclavado, que en caso de actuación generarán la apertura del relé de emergencia de la estación.

4.3.2 Seguridad en los vehículos a gas

Los vehículos a gas son más seguros que los que usan gasolina y al menos tanto como los de gasóleo, estando esto fundamentado en las características de seguridad que aportan. El gas (biogás y GN, pero no los GPL) es más ligero que el aire y si se produjera un escape, se dispararía rápidamente. Requiere temperaturas más altas para su ignición. Además, los tanques utilizados en los cilindros para almacenar gas natural vehicular son más resistentes que los de gasolina, no generan atmosferas explosivas, ya que el depósito es absolutamente hermético, y se les somete a exigentes pruebas que garantizan su excelente calidad.

Existen una serie de precauciones básicas con el manejo y trasiego de los combustibles, pero en el caso de vehículos propulsados con gas, se enumeran las siguientes:

- **Inspección periódica de los cilindros, de ser necesario tener que variarlo, debe hacerse en un lugar autorizado y no verter el gas al aire.**
- **Verificar conexiones eléctricas que pudiesen originar cortocircuitos.**
- **Antes de realizar cualquier operación de mantenimiento se deben despresurizar todos los circuitos.**

4.4 Prestaciones de vehículos con motores de Gas Natural Comprimido (CNG)

En este apartado se hará un estudio de las prestaciones de los vehículos que son propulsados por motores de combustión interna alternativos y alimentados con Gas Natural Comprimido y biogás. Se valorarán: Potencia, Consumo, Emisiones.

4.4.1 Comparación de la potencia de los vehículos con CNG

Se ha de tener en cuenta una serie de consideraciones para comparar la potencia que se puede obtener de un combustible gaseoso frente a la gasolina. Estas son las siguientes: **Poder calorífico**, **Dosado estequiométrico**, **Volumen ocupado** por el combustible dentro del cilindro y **Calor latente** de vaporización. Se van a distinguir dos supuestos en función del tipo de motor. [Castaño, 2010]

4.4.1.1 Inyección directa (multipunto)

En este caso el volumen ocupado por el combustible no influye sobre la cantidad de aire que entra en la cámara de combustión. La fórmula que nos da la potencia desarrollada por un motor es la Ecuación 9 deducida en el apartado 2.5.4, suponiendo constantes los parámetros de diseño y operación.

$$N_e = [\eta_v \cdot \eta_e \cdot i \cdot V_T] \cdot \{n \cdot \rho_{aref} \cdot F_e\} \cdot \overbrace{C \cdot F_r \cdot H_c}$$

Ecuación 9: Rendimiento de un MCIA en función de parámetros de diseño, operación y EFQ

La potencia motor vendrá dada para el combustible conociendo F_r , tal como se refleja en la Tabla 7

Combustible	Dosado esteq.	Poder Calorífico [MJ/kg]	Potencia Motor
Gasolina	1/14,9	43,7	2933°C
Metano	1/17	25 - 40	2905°C

Tabla 7: Potencia Motor para combustibles conociendo su dosado y su poder calorífico (Elaboración propia)

Al dividir las potencias de motor de gasolina y el metano se observa que disminuye tan solo un 1%.

4.4.1.2 Inyección indirecta (monopunto)

El aire de admisión se aporta directamente al combustible en forma de gas (CNG), no se tiene el efecto positivo del calor latente de vaporización sobre el rendimiento volumétrico, que tiene la gasolina. Se tendrá entonces una importante pérdida de rendimiento volumétrico, entorno al **7,5%** y una disminución equivalente de potencia. [Castaño, 2010]

Al sumar los efectos correspondientes al mayor volumen ocupado por el gas de la mezcla y la disminución del rendimiento volumétrico respecto a la gasolina, se considera un efecto positivo que es el rendimiento en la combustión pero las pérdidas de potencia están siempre entre **8-15%**, por eso para minimizarlas se compensa aumentando la relación de compresión o emplear sobrealimentación.

4.4.2 Comparación del nivel de ruido de los vehículos con CNG

Los vehículos de GNC presentan niveles de emisión sonora inferiores a los producidos en los motores diésel, se estima entre 5 y 10 decibelios, así como menores niveles de vibración. [Moreno, 2011].

4.4.3 Comparación del consumo de combustible de los vehículos con CNG

El gas por estar en este estado de agregación a temperatura ambiente, forma una mezcla mucho más homogénea que la gasolina, resultando un mejor rendimiento térmico y por lo tanto un menor consumo en unidades de energía (kJ/km), aunque se debe matizar que expresado en unidades de volumen o masa es superior debido a su menor densidad energética. Se explica con mayor detalle el consumo de los motores en el apartado 5 de este trabajo.

4.4.4 Comparación de las emisiones contaminantes de los vehículos con CNG

La mayoría de vehículos de gas natural comprimido (GNC) disponen de "catalizadores de tres vías", y se llaman así porque reducen las emisiones de tres contaminantes: Dióxido de Carbono, Hidrocarburos sin quemar y Óxidos de Nitrógeno. Consta en realidad de 2 partes diferenciadas: un catalizador de reducción que reduce el NO y un catalizador de oxidación que logra oxidar el CO y los hidrocarburos.

Un estudio realizado por [Subramanian, 2013], para un vehículo del tipo compacto que se puede encontrar a la venta, propulsado por un motor MEP de 3 cilindros en línea, modificado para consumir combustibles gaseosos (Bi-fuel) con una relación de compresión 11,5:1, de potencia 15 kW y masa 950 kg, realiza del Ciclo Indio Modificado de Conducción (MICD), con combustibles de Gas Natural (84% CH₄,4% CO₂) y biometano (93% CH₄,4% CO₂).

El ciclo se muestra en la Ilustración 12

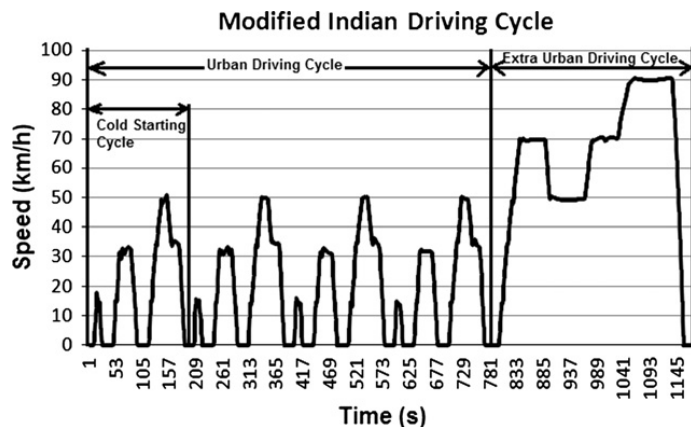


Ilustración 12: Modified Indian driving cycle (MIDC). [Subramanian, 2013]

Los resultados de las emisiones se reflejan en la Tabla 8

Combustible	HC [g/km]		CO [g/km]		NO _x [g/km]		CO ₂ [g/km]	
	UDC	EUDC	UDC	EUDC	UDC	EUDC	UDC	EUDC
Gas Natural	0,202	0,108	0,792	0,253	0,062	0,003	144,3	94,9
Biogás enriquecido	0,205	0,104	1,105	0,156	0,138	0,006	146,3	94,06

Tabla 8: Comparación de emisiones entre ciclo urbano y extraurbano. [Subramaniam, 2013]

Se puede observar que:

- **CO:** Con el motor en frío y en la parte urbana del ciclo (UDC) aumentan las emisiones de CO, menor temperatura indica menor tasa de oxidación de CO a CO₂. En el ciclo extraurbano el Biogás enriquecido emite menos CO que el GNC, esto se debe a la mayor proporción de CH₄ en el Biogás enriquecido
- **CO₂:** No se aprecian diferencias entre ambos combustibles.
- **HC:** Las emisiones de hidrocarburos sin quemar siguen las tendencias expuestas para el CO.

Los motores que trabajan con gas natural emiten baja cantidad de CO, CO₂ y de compuestos orgánicos volátiles (VOC), no emiten partículas, ni SO₂. Si el combustible que se usa es biometano el efecto incremental sobre balance de CO₂ es nulo. [Castaño, 2010].

- **Comparación con vehículo (bi-fuel) respecto de gasolina:** CO (-60/-80%); NMOG (gases orgánicos distintos del metano) (-87%); NO_x (-50/-80%); CO₂ (-15/-20%); Precusores de O₃ (-80/-90%). [Tinaut, 2011a]
- **Comparación con vehículo (bi-fuel) respecto de gasóleo:** CO (-70/-90%); NMOG (gases orgánicos distintos del metano) (-40/-60%); NO_x (-80/-90%); CO₂ (-15/-20%); Partículas (-90/-95%). [Tinaut, 2011a]

Se producen importantes disminuciones, entre el 50 y el 80%, de otros componentes no limitados en los gases de escape: formaldehídos, hidrocarburos policíclicos, aromáticos, olefinas... [Castaño, 2011].

- **Comparación con vehículo (dual-fuel) respecto de combustible fósil:** CO (-98%); NO_x (-65%); CO₂ (-25% gasolina; -90% gasóleo); Precusores de O₃ (-80/-90%).

4.4.5 Comparativa de emisiones de escape vehículos comerciales a gas

Se han revisado catálogos de fabricantes para establecer una comparativa de vehículos con combustibles gaseosos con respecto a los alimentados por combustibles fósiles. En la bibliografía se han encontrado los siguientes para un Opel Zafira: [Moreno, 2011]

- 1.6 16v GNC 150 CV ecoFlex 5p (Gas Natural comprimido)
- 1.8 16v Easytronic 140 CV Cosmo 5p (Gasolina)
- 1.9 CDTi 150 CV Cosmo 5p (Diésel)

En la Ilustración 13 y en la Tabla 9 se muestran las emisiones para los vehículos

Emisiones	GNC	Gasolina	Diesel
CO ₂ (g/km)	139	172	159
CO (g/km)	0,215	0,567	0,114
NO _x (g/km)	0,022	0,039	0,221
HC (g/km)	0,065	0,086	0,016

Tabla 9: Emisiones para vehículos equivalentes con GNC, Gasolina, y Diesel. [Moreno, 2011]

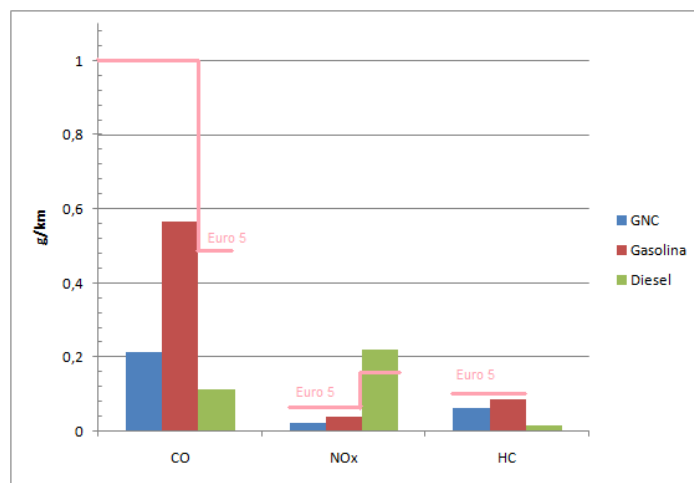


Ilustración 13: Emisiones para Opel Zafira alimentado con GNC, Gasolina, y Diesel. [Moreno, 2011]

Existen fabricantes de automóviles que ofrecen en sus catálogos vehículos a gas natural (BMW, Chrysler, Fíat, Ford, Honda, Volvo entre otras, se puede consultar un catálogo en la página web del IDAE.). Un ejemplo de un vehículo utilitario actual de venta en el mercado español es el Fiat Punto 1.4 Natural Power. Se trata de un motor Euro 5 de dos combustibles, que puede funcionar con gasolina y con GNC. Posee dos depósitos de acero (integrados bajo el piso del vehículo para no alterar el espacio de carga útil) que proporcionan una capacidad total de 84 litros (13 kg de metano). Esta capacidad asegura una autonomía de 310 km (ciclo mixto). Con un depósito de 45 litros de gasolina (la misma capacidad que en la versión de gasolina convencional), la autonomía total supera los 1.000 kilómetros. En la Tabla 10 se muestran los consumos de combustibles del vehículo así como el coste del combustible, tomando como referencia de densidad 0,78 kg/l para la gasolina y 0,84 kg/l para el diesel. Se estima una vida media del vehículo por parte del fabricante de 250.000 km.

Consumo	GNC	Gasolina	Diesel	Coste Vehículo Gasolina (€)	Coste Vehículo Diesel (€)	Coste Vehículo GNC (€)
Urbano (kg/100km)	5,4	6,16	4,62	14.150	15.500	17.000
Extraurbano (kg/100km)	3,5	4,21	2,94			
Mixto (kg/100km)	4,2	4,91	4,37			
Coste €/kg Combustible	0,749	1,94	1,73			
Coste €/100 km	3,15	9,52	7,56			
Coste € (vida útil)	24.875	37.950	34.400			

Tabla 10: Consumos y costes vehículo Fiat Punto alimentado con GNC, Gasolina, y Diesel. [Elaboración Propia]

4.4.6 Resumen de los comportamientos de los vehículos con CNG

4.4.6.1 Ventajas del CNG respecto de los combustibles tradicionales

- Combustible más económico que gasolina y diésel y precio más estable.
- Su uso generalizado permitiría una menor dependencia del petróleo.
- Vehículos más seguros que los de gasolina, por ser más ligero que el aire.
- Disminución de emisiones contaminantes: CO₂, CO, HC, NOx y partículas.
- Disminución de consumo energético (mayor rendimiento de los motores).
- Reducción de emisiones sonoras y de vibraciones, sobretodo en vehículos pesados (mezcla más homogénea).
- Mayor durabilidad del motor y menor costo de mantenimiento.
- Se eliminan las pérdidas por volatilización en el repostaje (≠sistema de llenado).
- Vehículos dedicados: mejor rendimiento y emisiones, con mezclas pobres.
- Los vehículos ligeros tienen un precio de adquisición similar a los vehículos diésel.

4.4.6.2 Inconvenientes del CNG respecto de los combustibles tradicionales

- Requisitos especiales para el depósito y revisiones de seguridad, en vehículos y en las estaciones de abastecimiento
- Depósito de combustible adicional en vehículos bi-fuel y dual-fuel. (mayor peso)
- Menor autonomía
- Escasez de puntos de abastecimiento.
- Pérdida de prestaciones en algún caso hasta el 10%.

5 Prestaciones y emisiones contaminantes de los motores con biogás

5.1 Introducción

En este apartado se evaluarán las diferentes prestaciones y emisiones ofrecidas por los Motores de Combustión Interna Alternativos (MCIA), para diferentes combustibles en comparación con el uso de biogás como combustible. Debido a limitaciones de las reservas de combustibles fósiles convencionales se ha intensificado la búsqueda de combustibles alternativos para el uso en el motor de combustión interna. Muchos motores comerciales, tanto diesel como gasolina se han convertido para ser alimentados con gas natural, gas licuado de petróleo (GPL) y gas pobre, para su uso en la generación eléctrica, transporte además de otras aplicaciones. Presenta una serie de ventajas como la reducción de las emisiones de escape y mejora la eficiencia térmica bajo ciertas condiciones con la operación de gas natural o con biogás aunque este último tiene una entalpía baja de combustión y el motor da una menor potencia de salida.

Se establecen distintos modos de funcionamiento de los MCIA tanto en encendido por chispa (MEP), como encendido por compresión (MEC) o en funcionamiento dual (gasóleo-gas).

5.2 Prestaciones específicas en motores con biogás en modo MEP

El proceso de combustión de un gas que se produce en un MEP es un proceso de deflagración donde el combustible se va quemando a medida que el frente de llama recorre la cámara de combustión. El proceso se inicia por una chispa eléctrica y dura el tiempo que el frente de llama recorre la cámara de combustión. [Melgar, 2013]

Se centra el estudio en una revisión de las principales prestaciones de los MCIA en función del combustible utilizado por lo que para un motor tipo de ensayo se buscan las condiciones óptimas de funcionamiento tanto del motor como del combustible. En este caso particular se realizaron los ensayos con motor E6 Engine Investigación Ricardo monocilíndrico de cuatro tiempos, con válvula de asiento, la velocidad de funcionamiento normal del motor es 1000-3000 r/min. El motor puede trabajar en modo de encendido por chispa (SI) o compresión (CI) y el relación de compresión en la versión de encendido por chispa puede variar entre 4,5:1 y 20:1. Se realiza un ajuste de la válvula reguladora para mantener una sincronización óptima de la chispa, que va desde 40° hasta 50° antes del punto muerto superior (PMS). Además se puede modificar su relación aire/combustible también llamada relación de aire (inverso de dosado relativo) para mezclas ricas hasta pobres, aunque para los MCIA de modo de encendido, los dosados con mejores prestaciones son los que están cercanos al estequiométrico, es decir el dosado relativo cercano a 1. [Huang 1998], [Crookes 2006]

En los ensayos los combustibles usados son el Gas Natural Comprimido (GNC) con composición de metano (CH₄) de 92,08%, etano (C₂H₆) de 3,25% y propano (C₃H₈) de 0,625% y otros en mínimas proporciones. Con el fin de simular el biogás se añade a la composición del GNC un porcentaje de CO₂, y en la literatura consultada los rangos óptimos para simular el biogás es del orden del 35% de CO₂ en un mezclador de gases aguas arriba del sistema de carburador.

- **Potencia y eficiencia térmica**

La Ilustración 14, se muestra gráficamente los resultados de variación del porcentaje de CO₂, con respecto a la potencia freno y eficiencia térmica (bte), mezclas pobre (RAFR 1,05) y rica (RAFR 0,98).

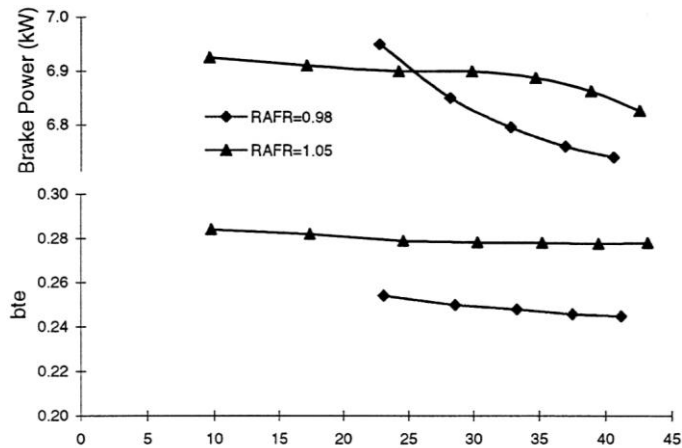


Ilustración 14: Brake power and bte with CO₂ fraction in mixture at 2000 r/min, CR=13. [Huang 1998]

Se observa que la potencia efectiva (al freno) para relación aire-combustible mayor (RAFR = 1,05, mezcla pobre) se mantiene casi constante, independientemente de la variación del porcentaje de CO₂ en la mezcla (excepto si se supera el 40%), pero sí decrece sustancialmente para el caso de RAFR baja (0,98) al aumentar la proporción de la mezcla en el carburador. La eficiencia térmica se reduce un 3% aproximadamente para mezclas ricas (RAFR= 0,98). La presencia de dióxido de carbono en el biogás reduce la velocidad de combustión que afecta al rendimiento del motor.

Otra forma de representar lo explicado en el párrafo anterior es mostrar la potencia, frente a la relación aire-combustible, mostrando el consumo específico de combustible. En este caso se toman distintas proporciones de CO₂, (20%,30%,40%) con el GNC y se observa que la potencia al freno se mantiene relativamente sin cambios a variaciones de proporción de CO₂ en la mezcla. Sin embargo el mínimo del consumo específico de combustible (SFC) se incrementa, a partir de un mínimo de aproximadamente 0,07 kg / MJ, por el exceso de CO₂, (Ilustración 15).

Como el metano en el biogás es el combustible principal, un aumento de dióxido de carbono en el biogás reduce la cantidad de metano que entra en el cilindro del motor por ciclo. Para conseguir la misma potencia al freno en el motor se debe aumentar el caudal de la mezcla para igualar el efecto de contenido de dióxido de carbono en el biogás (Ilustración 16). [Bari 1996]

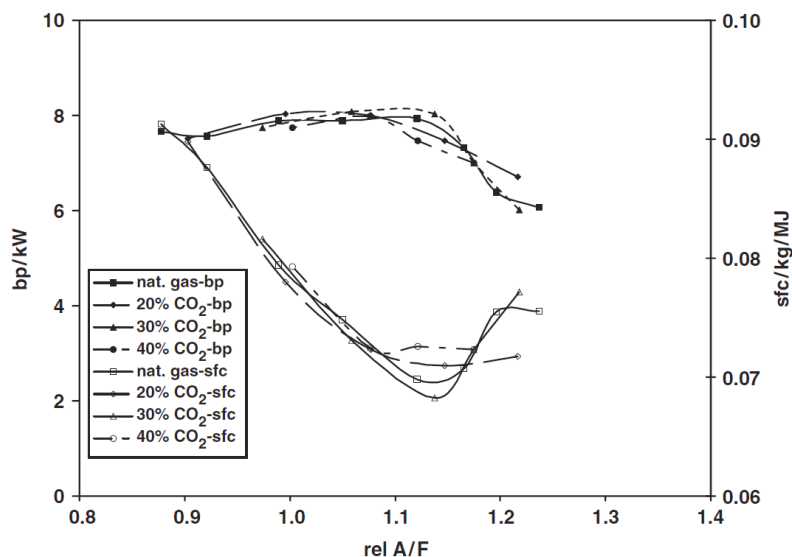


Ilustración 15: Variation of brake power and specific fuel consumption with relative air:fuel ratio for different bio-gas composition. 2000 rpm. CR= 11:1 [Crookes, 2006]

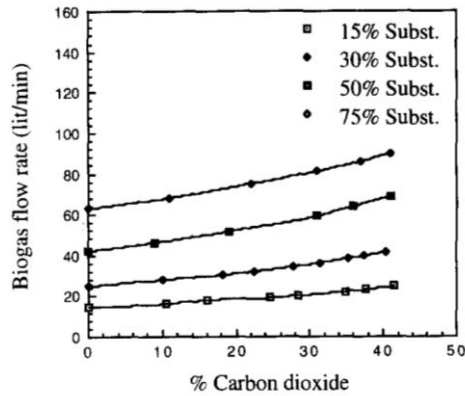


Ilustración 16: Variation of biogas flow with the increase of carbon dioxide in biogas. [Bari, 1996]

La geometría de la inyección de gas combustible (contracorriente o equicorriente) tuvo poco efecto en el rendimiento del motor y en las emisiones. [Huang, 1998]

En la Ilustración 17 se muestra el rendimiento efectivo (bte) para un biogás de composición 60% de CH₄ y 39% de CO₂, con el dosado a plena potencia, y éste es mayor cuanto mayor es la relación de compresión y en las proximidades del dosado estequiométrico.

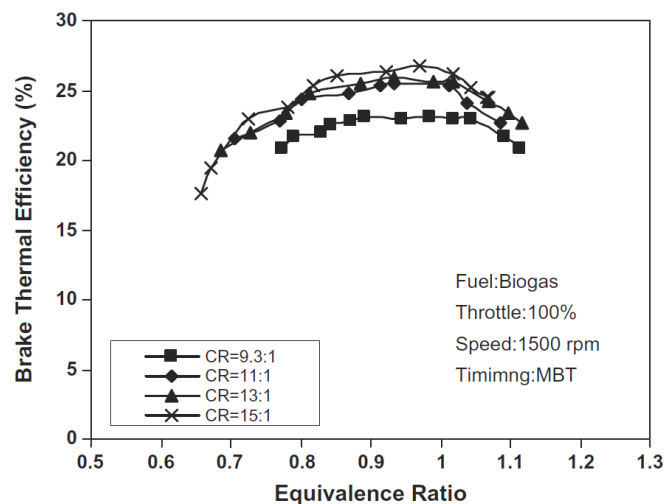


Ilustración 17: Variation of brake thermal efficiency with equivalence ratio at full throttle. [Porpatham, 2012]

La presión máxima en la cámara de combustión disminuye con el aumento de la proporción de CO₂ en el combustible y aumenta con la relación de compresión, se grafican en la Ilustración 18.

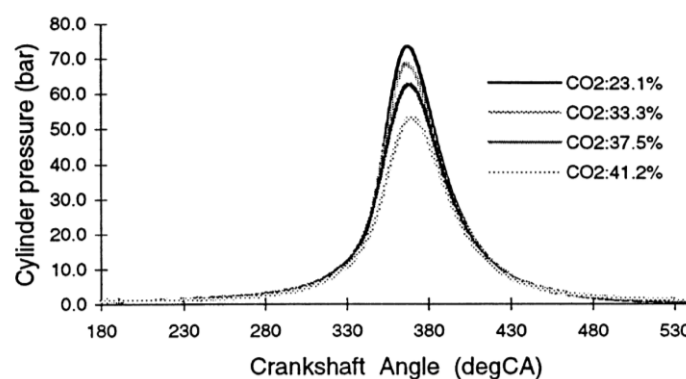


Ilustración 18: Presión máxima en la cámara de combustión, respecto de porcentaje de CO₂. [Huang 1998]

- **Presiones máximas en el cilindro**

La Ilustración 19 indica que a mayor relación de compresión se aumenta la presión máxima en la cámara de combustión. Se observa detonación en valores de relación de compresión de 15:1.

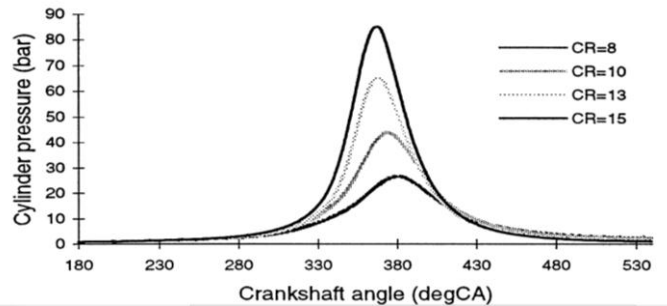


Ilustración 19: Presión máxima en la cámara de combustión, respecto de relación compresión. [Huang 1998]

- **Variación de la Presión Media efectiva al freno y la Eficiencia Térmica, con la relación de compresión**

Al variar las relaciones de compresión, así como los controles de avance de inyección/encendido se mejora el rendimiento del motor, siendo las relaciones de compresión siempre mayores en los combustibles gaseosos que en la gasolina (8,5). [Chandra, 2011]

La Ilustración 20 refleja los valores de la presión media efectiva al freno (bmep) y la eficiencia energética (bte) para diferentes relaciones de compresión y con relaciones al aire del intervalo (1,05-0,95), produciéndose un crecimiento hasta un valor crítico de relación 13:1 donde a partir de ahí solo aumenta ligeramente. [Huang, 1998].

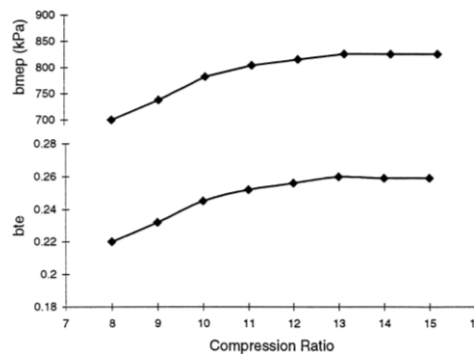


Ilustración 20: Variation bmep and bte with compression ratios at 2500 r/min, RAFR=0.97, CO₂ =37.5%. [Huang 1998]

- **Temperatura de los gases de escape**

La temperatura de los gases de escape disminuye después del proceso de expansión por una combustión incompleta. [Huang, 1998]. El gas presenta una composición de 60% y 40% de CH₄ y CO₂ respectivamente. (Ilustración 21).

Se debe tener en cuenta que el aumento de la relación de compresión se sabe que tiene el efecto de aumento de la temperatura en el cilindro y el NO_x y HC. [Crookes 2006]

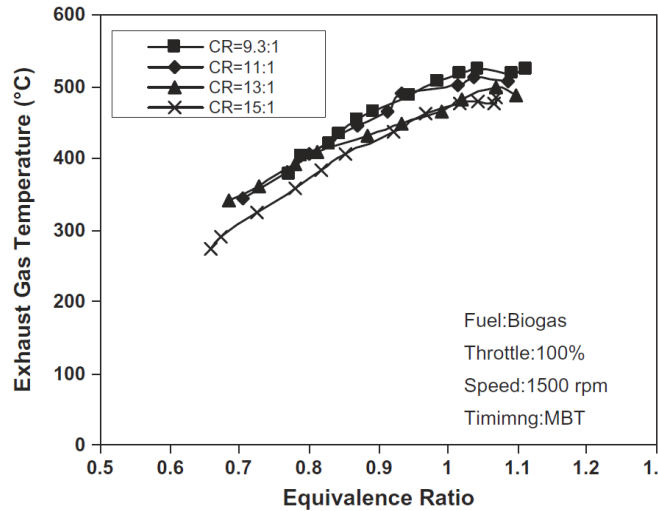


Ilustración 21: Variation of exhaust gas temperature with equivalence ratio at full throttle. [Porpatham 2012]

- **Variación de la Presión Media efectiva al freno y la Eficiencia Térmica, con relación la relación de aire.**

La Ilustración 22 muestra tendencias similares para la eficiencia térmica y presión media efectiva al freno de los motores SI convencionales y alimentados con combustibles convencionales. A una velocidad de giro más alta, mayores pérdidas por fricción del flujo y la reducción de la relación de masa de aire en el cilindro disminuyendo la Presión Media Efectiva (bmep) y la eficiencia térmica (bte)

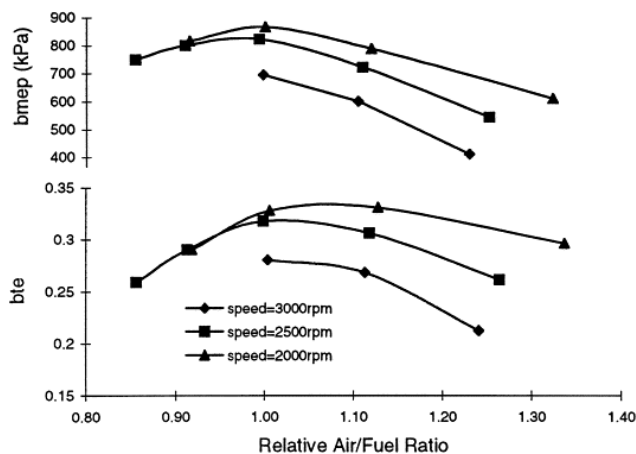


Ilustración 22: Variation bmep and bte with engine speed, CO₂ =38%. [Huang 1998]

- **Variación del grado de avance en motor para combustibles gaseosos**

Mediante la adaptación de un motor diesel 5,9 kW de encendido por compresión a un sistema de encendido provocado para tres tipos de combustibles gaseosos como son el gas natural, el biogás enriquecido (95% de CH₄, 3% CO₂) y el gas de gasificación (65% CH₄, 32%CO₂), indica que la potencia al freno máxima se da a 35° de avance de encendido para los tres combustibles, así como su mejor relación de compresión 12,65:1. (Ilustración 23). [Chandra, 2011].

Además se puede observar una pérdida de potencia de 31,8%, 35,6% y 46,3% para el natural comprimido gas, el metano enriquecido biogás y el biogás bruto, respectivamente.

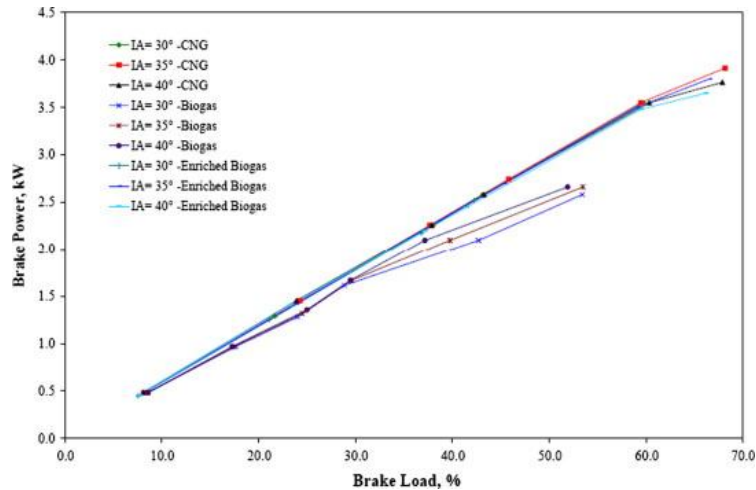


Ilustración 23: Brake power developed by the engine on selected fuels. [Chandra 2011]

- **Introducción de Hidrógeno en el biogás**

Los experimentos llevados a cabo en un motor MEP alimentado con diferentes proporciones de hidrógeno (5%, 10% y 15%) en el combustible muestran que la adición de H₂ en pequeñas cantidades al biogás hasta 15% puede mejorar la potencia y la eficiencia térmica y reducir las emisiones de HC. (Ilustraciones 24 y 35). [Porpatham et al., 2007].

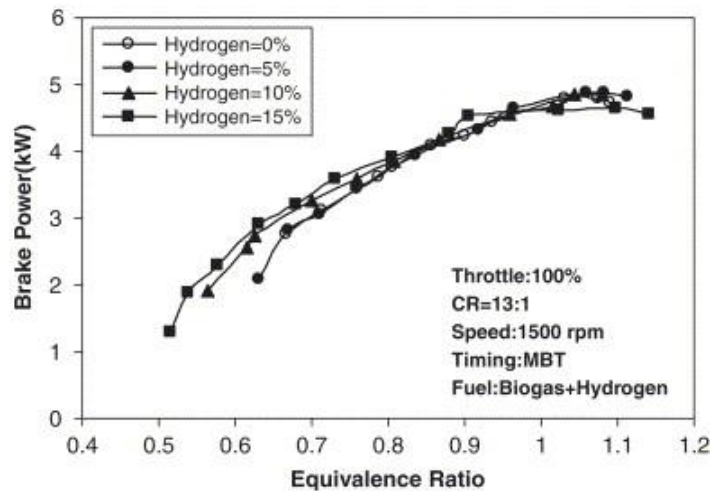


Ilustración 24: Variation of brake power with equivalence ratio. [Porpatham, 2007]

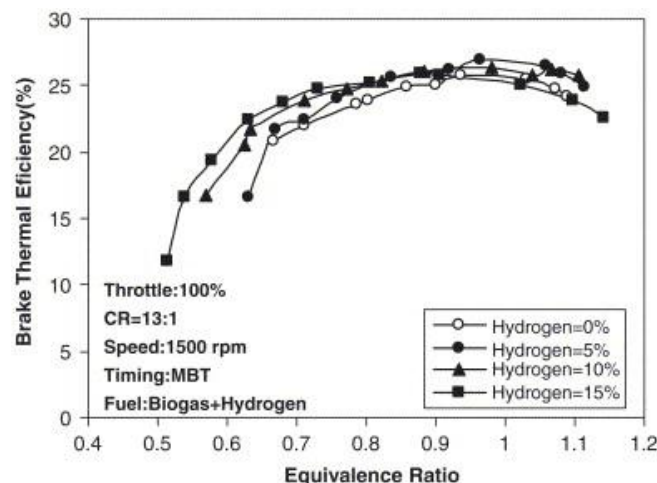


Ilustración 25: Variation of brake thermal efficiency with equivalence ratio. [Porpatham, 2007]

- **Variación de retraso de encendido**

La variación del retraso representada en grados antes del PMS para diferentes relaciones de compresión y dosados se representa en la Ilustración 26, para un biogás de composición CH₄ y CO₂ de 60% y 39% respectivamente.

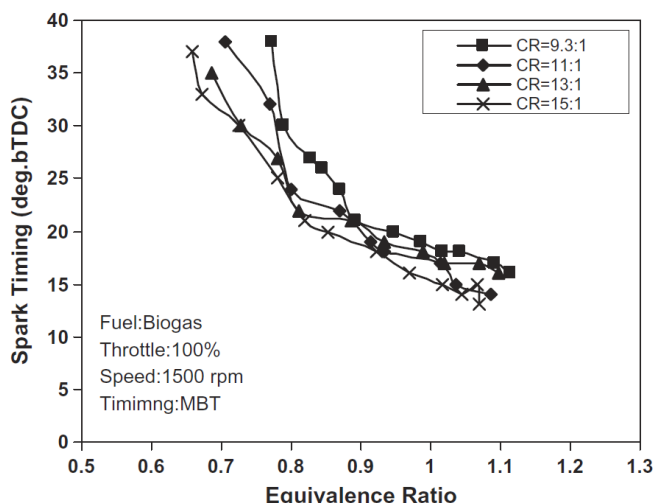


Ilustración 26: Variation of spark timing with equivalence ratio at full throttle. [Porpatham, 2012]

5.3 Emisiones contaminantes de los motores MEP con biogás

Con el fin de evaluar el conjunto de datos de emisiones se establece como referencia las emisiones del gas natural o biogás enriquecido, en un motor MEP a 2000 rpm y una relación de compresión de 11:1 en el que se varía la relación de aire/combustible. (Ilustración 27).

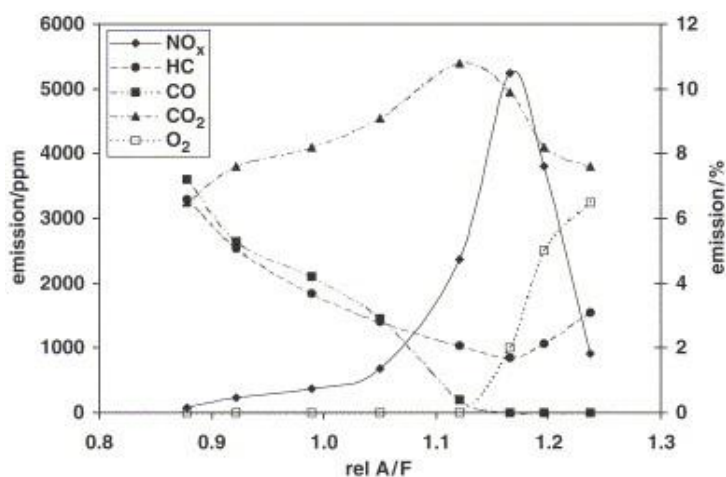


Ilustración 27: Variation with relative air:fuel ratio of exhaust emissions for natural gas. [Crookes 2006]

Las emisiones de dióxido de carbono (CO₂), Hidrocarburos sin quemar (HC), y óxidos de nitrógeno se representan en la Ilustración 28, con el motor descrito en el punto 5.2 del presente trabajo modificando la proporción de CO₂ en el motor. En la Ilustración 29 se muestran las emisiones a 2500 r/min, RAFR=0.97, CO₂ =37.5%.

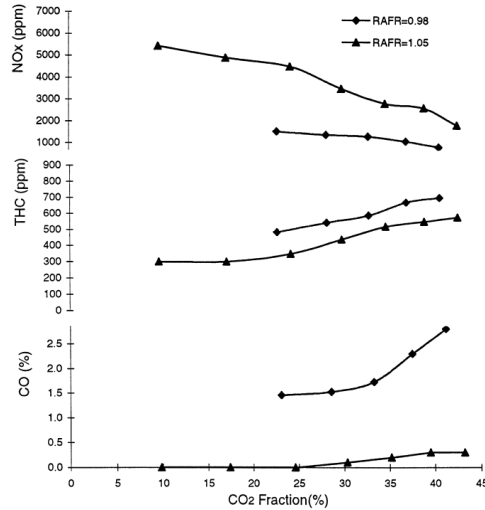


Ilustración 28: Variation of exhaust gas emissions with CO₂ fraction in mixture at 2000 r/min, CR=13. [Huang 1998]

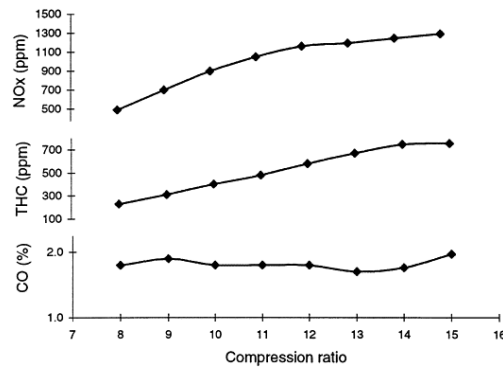


Ilustración 29: Variation of exhaust gas emissions with compression ratios at 2500 r/min, RAFR=0.97, CO₂=37.5%. [Huang 1998]

5.3.1 Óxidos de Nitrógeno

El objetivo de introducir dióxido de carbono (CO₂) en un combustible, cuando alimenta a un MCI es reducir las emisiones de NOx al 50% por debajo de 7g/MJ, [Crookes, 2006] y no permitir que la relación de compresión se aumente ya cuanto mayor sea esta; mayor será la presión media efectiva y la eficiencia térmica del freno, también aumenta la temperatura en la cámara de combustión y provoca mayores emisiones de NOx y HC como se verá a continuación.

Los óxidos de nitrógeno aumentan con, la relación de compresión y disminuyen con un aumento de la proporción de CO₂, especialmente en relaciones de aire/combustible mayores que la unidad, es decir para dosados pobres. (Ilustración 30)

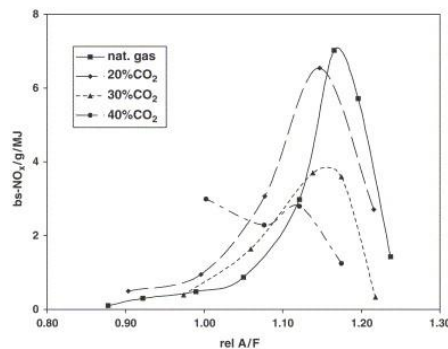


Ilustración 30: Effect of bio-gas carbon dioxide fraction on brake-specific oxides of nitrogen. 2000 rpm. CR= 11:1 [Crookes 2006]

Se puede sustituir la proporción de CO₂ en una mezcla combustible por el equivalente de Nitrógeno (N₂) en igual proporción, así se ve si el proceso que afecta a la emisión de NOx es físico o químico.

Las Ilustraciones 31 y 32 muestran datos de N₂ mezclado junto a las de gas natural y se compara con iguales proporciones de CO₂ en gas natural. Los resultados son similares a los descritos anteriormente para el CO₂. Siendo similares las emisiones de NOx para ambos gases inertes se deduce que su origen no es químico, sino más bien relacionado con un efecto térmico.

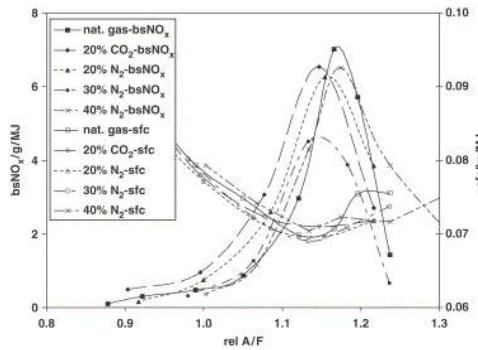


Ilustración 31: Effect of bio-gas composition on brake-specific oxides of nitrogen and specific fuel consumption with nitrogen addition. 2000 rpm. CR= 11:1 [Crookes 2006]

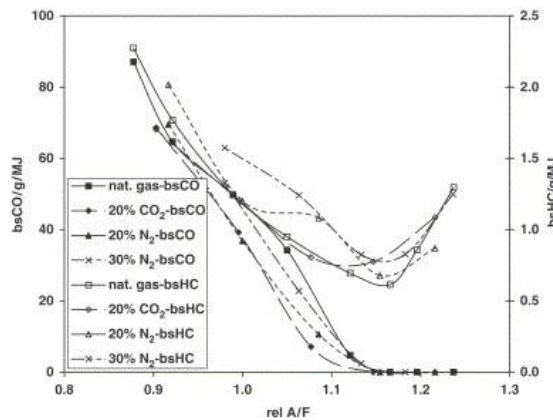


Ilustración 32: Effect of bio-gas composition on brake-specific carbon monoxide and unburnt hydrocarbons with nitrogen addition. 2000 rpm. CR= 11:1 [Crookes 2006]

En el caso de que al biogás se le añadan fracciones de hidrógeno (H₂) con mezclas pobres provoca una mejor combustión (Ilustración 34), temperaturas más altas y por lo tanto el nivel de NO mayor. (Ilustración 33).

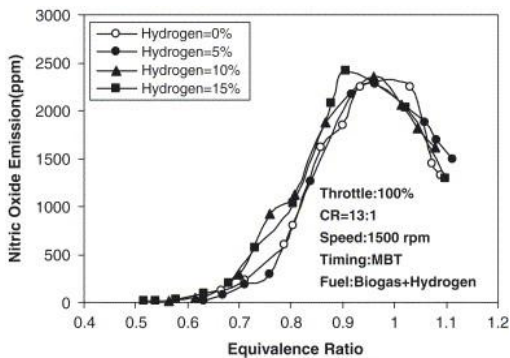


Ilustración 34: Variation of nitric oxide emission with equivalence ratio. [Porpatham, 2007]

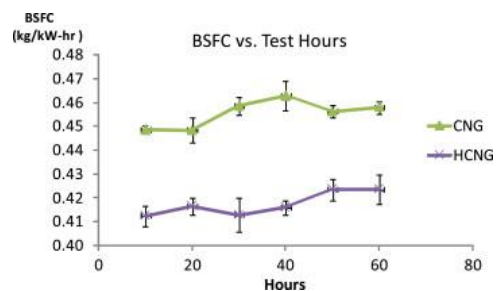


Ilustración 33: Variation in BSFC during endurance tests. [Reji, 2011]

5.3.2 Monóxido de carbono

El monóxido de carbono (CO) disminuye ligeramente con la relación de compresión hasta un valor crítico 13:1 (Ilustración 35), a partir de ahí aumenta. Si se varía la proporción de CO₂ hacia valores mayores, conlleva a un mayor aumento de la cantidad de CO en los gases de escape especialmente en las mezclas ricas (RAFR<1). (Ilustración 28)

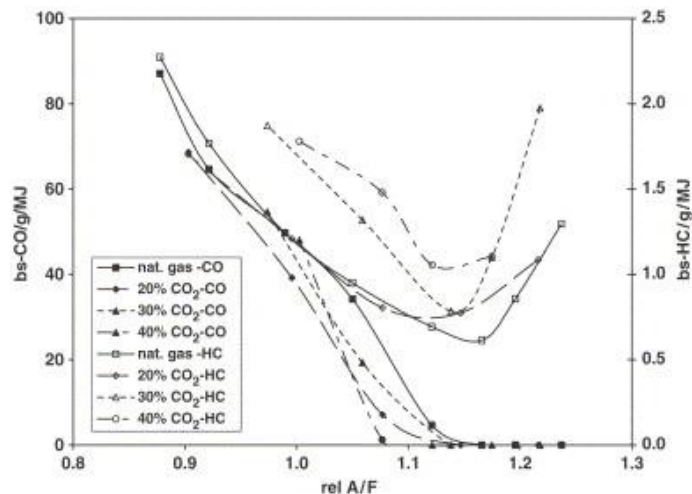


Ilustración 35: Effect of carbon dioxide fraction on brake specific-carbon monoxide and unburnt hydrocarbons, 2000 rpm, CR 11:1. [Crookes 2006]

5.3.3 Hidrocarburos sin quemar

Los hidrocarburos sin quemar (HC) aumentan ligeramente con la relación de aire tanto para mezclas ricas como pobres (Ilustración 35). Si se varía la proporción de CO₂ hacia valores mayores en el combustible aumenta casi proporcionalmente la cantidad de HC en los gases de escape, tanto para las mezclas ricas (RAFR<1) como las pobre (RAFR>1), produciéndose un mínimo en (RAFR=1,15). (Ilustración 28).

5.4 Prestaciones específicas y emisiones de MEP con biogás en modo EC

Con el fin de reducir las emisiones contaminantes de inyección directa (DI) en motores diesel, se usan combustibles gaseosos como gas natural (GN) o biogás (BG) para ser utilizados como combustibles parciales en la combustión, a este modo de funcionamiento se denomina dual. En funcionamiento dual los combustibles gaseosos son la fuente energía principal (conocida como primaria combustible) y una cantidad mínima de combustible líquido como el diesel (conocido como combustible piloto) actúa como la fuente de ignición. Se han realizado diversos experimentos para analizar la influencia de la combustión dual en las emisiones de rendimiento y de escape de un motor diesel DI alimentados con gas natural (GN) y los biogás (BG). Permiten además trabajar con relaciones de compresión más elevadas, permitiendo el uso de combustibles alternativos de bajo contenido energético como el biogás. Sin embargo, presentan como desventajas los MEC que emiten contaminantes dañinos, incluyendo óxidos de nitrógeno (NOx) y partículas (PM).

Se reduce significativamente los niveles de emisiones de NOx mediante el avance de inyección hasta 55°-60° antes del punto muerto superior (APMS) pero con alguna penalización en las emisiones de UHC y la estabilidad del motor [Singh, 2004].

El uso de motores diesel como fuentes fiables y eficientes, además de presentar una alta eficiencia térmica (Ilustración 36), tiene bajas emisiones de hidrocarburos no quemados (HC), monóxido de carbono (CO), como se muestra en la Ilustración 29. [Seung, 2011].

Con el fin de verificar lo expuesto anteriormente [Seung, 2011], realiza una serie de ensayos con un motor diesel, de 4 tiempos y cuatro cilindros, refrigerado por agua con inyección indirecta y relación de compresión 19:1. Combina cuatro modos de funcionamiento, con un único combustible (diesel o biodiesel) y con funcionamiento dual (biogás+diesel o biogás+biodiesel). Las propiedades de los combustibles son las que se reflejan en la Tabla 11, con el fin de evaluar las emisiones y prestaciones del MEP mediante la combinación de los modos de funcionamiento.

Especie	Densidad Kg/m ³	Viscosidad cSt 40°C	% C	% H2	% O2	Pto Ebullición	Índice Cetano/Octano (biogás)	T ^a (°C) Autoignición	Relación A/F	PCI MJ/kg
Diesel	826	3,11	87	13	-	180-330	52-53	220-360	14,6	42,5
Biodiesel	881	4,75	78	11	11	315-350	57-58	<200	14,1	38
Biogás	0,65-0,91	-	20 a 40	1 a 3	0 a 5	-(126-162)	130	632-813	17,2	26,17

Tabla 11: Properties of the liquid test fuels and biogas. [Seung, 2011].

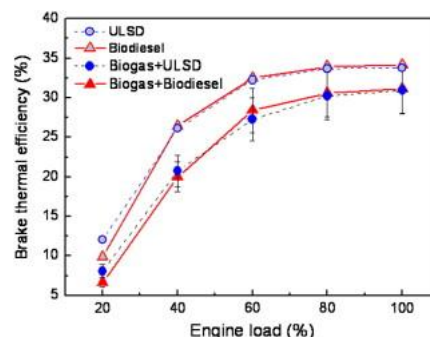
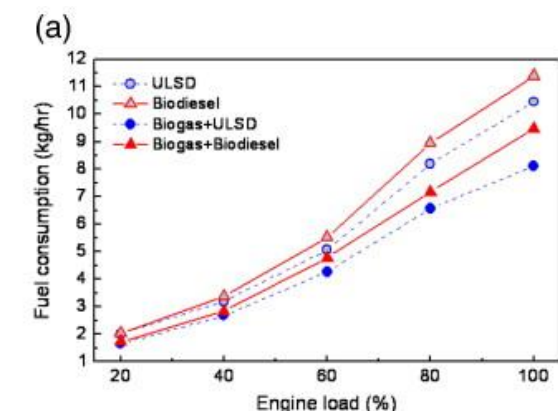


Ilustración 36: Effect of combustion mode and engine load on brake thermal efficiency. [Seung, 2011]

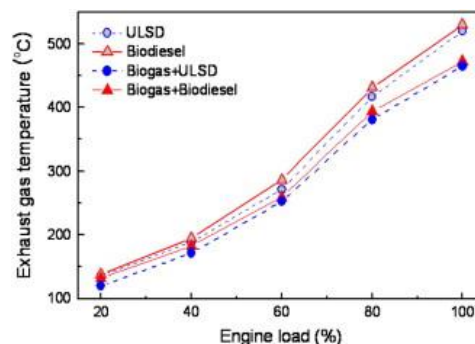
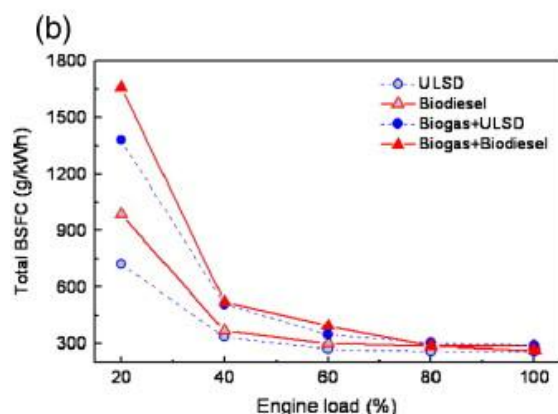


Ilustración 37: Effect of combustion mode on exhaust gas temperature vs load. [Seung, 2011]

Ilustración 38: Effect of combustion mode and engine load on fuel consumption of pilot fuel (ULSD, Biodiesel) at constant gas flow and total BSFC. [Seung, 2011]

En la Ilustración 37, se muestra la temperatura de los gases de escape, aumentando para todos los combustibles linealmente con el grado de carga del motor. La baja temperatura de gas se puede explicar por la disminución de la temperatura de la carga con el biogás y la fase de combustión retardada. Debido al retardo del encendido, se produjo el proceso de combustión retardada y

desplazado a la carrera de expansión, en el que la condición es que la temperatura y la presión en el cilindro disminuyeron y bajaron rápidamente, y luego estas propiedades causados para bajar la temperatura del gas de escape.

Estudios posteriores como los llevados a cabo por [Mustafi, 2013] mediante un motor diesel, modificado para funcionar en modo dual, aunque mantiene su configuración original de inyección para el diesel, que gira a una velocidad constante de 1750 rpm, monocilíndrico de inyección directa (DI), con una relación de compresión 16,5:1, la inyección se produce a 28° del PMS y a dos cargas diferentes: bajos (3 Nm, DL= diesel a baja carga) y alta (28 Nm, (DL= diesel a alta carga), que eran aproximadamente 10% y 85%, de la salida de par nominal del motor a 1.800 rpm, donde se midieron y evaluaron la presión de combustión y la tasa de liberación de calor, con el fin de analizar las características de combustión y sus efectos en el escape emisiones, incluidas las partículas en suspensión (PM) de combustible individual (diesel) y modos de combustión de combustible dual. Los combustibles son diesel como combustible piloto, Gas natural y biogás con las siguientes proporciones BG1 (80% CH₄, 20% CO₂), BG2 (67% CH₄, 3% CO₂), BG3 (58% CH₄, 42% CO₂) que se inyectan para los dosados relativos (mezclas pobres) 0,23; 0,62; 0,69; 0,77; 0,92; 0,99.

Los resultados del ensayo se evalúan en las siguientes prestaciones:

- **Presión en el cilindro, calor liberado y consumo específico de combustible**

En la Ilustraciones 39 y 40 se muestran los resultados de los ensayos:

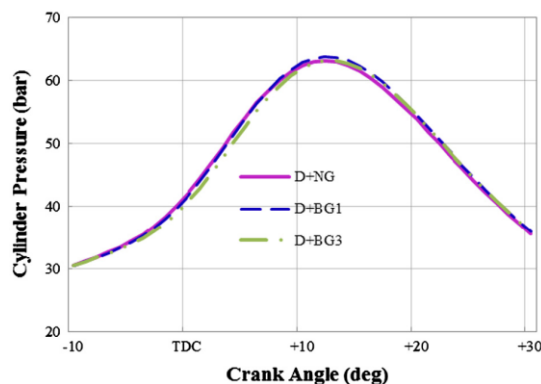
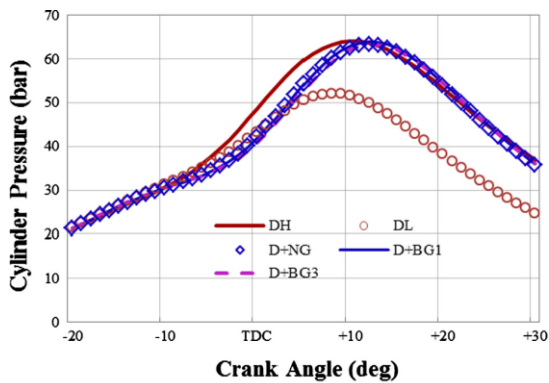


Ilustración 40: Cylinder pressure as a function of crank angle for: (a) diesel and dual fueling and (b) dual fueling (28 N m; at 1750 rpm and 28°bTDC). [Mustafi, 2013]

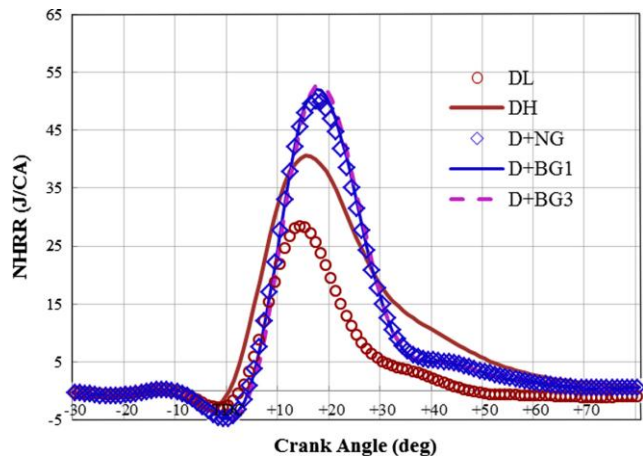


Ilustración 39: Net heat release rate as a function of crank angle for diesel (high) and dual fueling (28 N m; at 1750 rpm and 28°bTDC). [Mustafi, 2013]

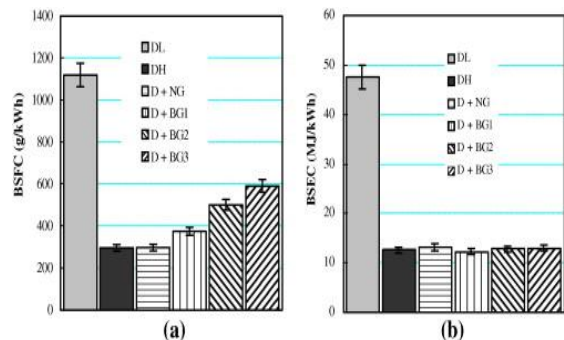


Ilustración 41: (a) Brake specific fuel consumption, and (b) brake specific energy consumption of the engine while operated with diesel and dual fuels (DL 3 Nm, DH and dual fueling 28 N m, at 1750 rpm, and 28°bTDC). [Mustafi, 2013]

Se deducen las siguientes conclusiones del gráfico 40:

- La presión en el cilindro aumenta al aumentar la carga para el diesel.
- La presión máxima es independiente del tipo de combustible, sin embargo se aprecia un retraso en la ignición.
- El introducir CO₂ en forma gaseosa no influye en la presión máxima en el cilindro

Se deducen las siguientes conclusiones para la liberación de calor (Ilustración 39):

- Es un 93% mayor para el diesel con carga que sin carga y un 30% mayor que el GN y biogás.
- El diesel es el combustible con el que más dura la combustión, esto la mayor dificultad de desarrollo de la misma.
- El mínimo de la curva indica el inicio de la combustión (zona positiva), al finalizar la combustión se vuelve alcanzar la zona negativa
- Un aumento de sustitución del combustible diesel por uno gaseoso implica disminuir el tiempo de combustión.

Referido al consumo específico (Ilustración 41 (a)), aumenta al aumentar la cantidad de CO₂ en la mezcla, aunque si se expresa en función de la energía consumida ésta se mantiene constante independientemente de la proporción de CO₂.

5.5 Emisiones contaminantes de los motores MEC con biogás

A fin de evaluar el conjunto de datos de emisiones se relacionan los resultados alcanzados en los ensayos realizados en la bibliografía consultada.

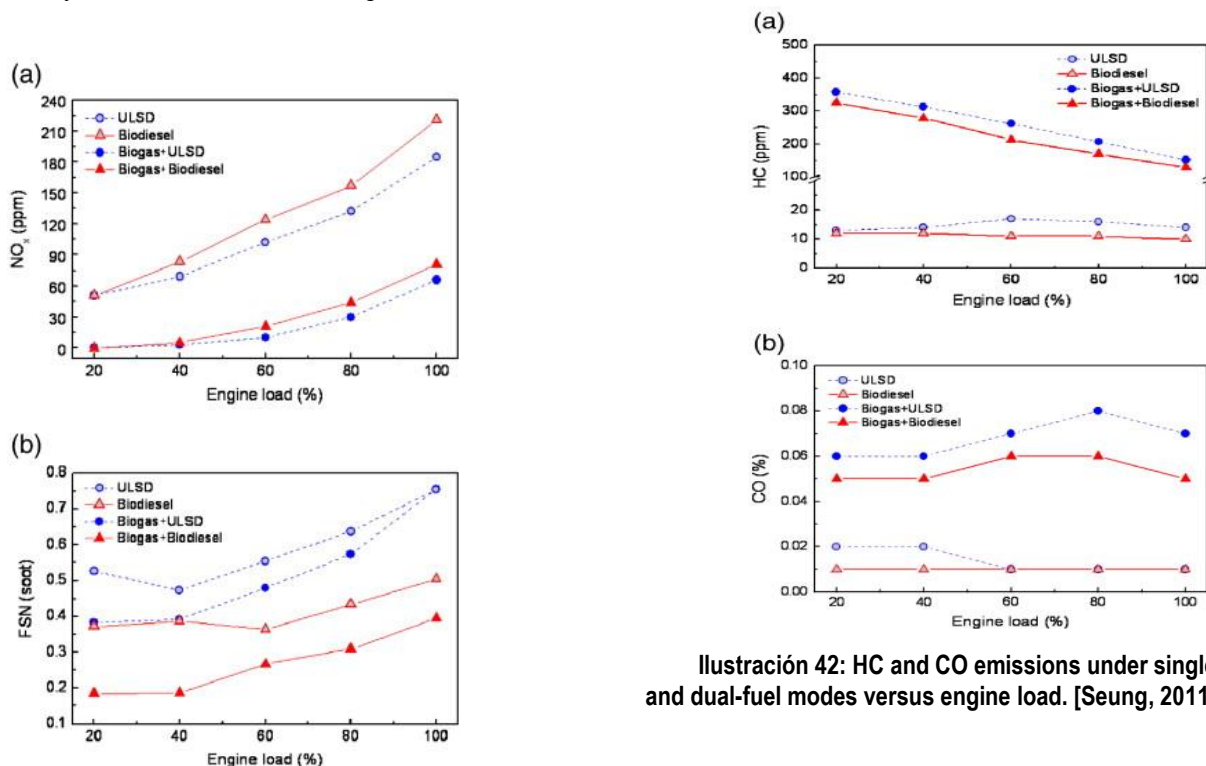


Ilustración 42: HC and CO emissions under single and dual-fuel modes versus engine load. [Seung, 2011]

Ilustración 43: Concentrations of NO_x and soot emissions under single and dual-fuel modes versus engine load. [Seung, 2011]

5.5.1 Óxidos de Nitrógeno

Se observa en la Ilustración 44 que al aumentar la carga, aumentan las emisiones de NO_x, para todas las combinaciones de combustibles tanto en modo único como en modo dual. A pesar de todo es notable la diferencia de emisiones de NO_x, alrededor del 70% de promedio. Esto es debido principalmente al resultado de la menor tasa de combustión del combustible gaseoso en presencia de CO₂ en el biogás.

A medida que la carga aumenta el nivel de emisiones de NO_x se redujo como se esperaba. Introducir combustibles gaseosos, en el motor y el uso de los biogás resultan ser más eficaces, así en el caso de doble combustible, la combustión y características de las emisiones dependen en gran medida del tipo, la calidad y el nivel de sustitución del combustible. (Ilustración 41).

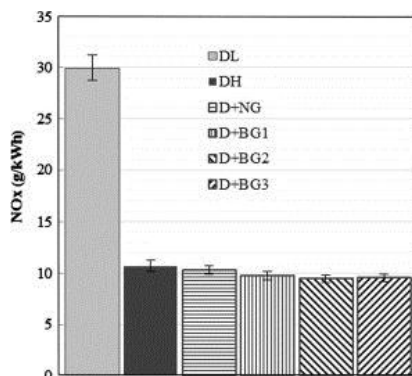


Ilustración 44: Concentrations Specific NO_x emissions for diesel and dual fueling (engine speed = 1750 rpm; torque = 3 N m (diesel low load) and 28 N m for others; injection at 28°bTDC). [Mustafi, 2013]

5.5.2 Monóxido de Carbono

Las emisiones de CO del diesel a carga baja son mucho mayores que a carga alta esto es debido a que la reacción de combustión es incompleta, descendiendo la temperatura y puede llegar a extinguirse la llama. Las emisiones de CO disminuyen al introducir el Gas Natural respecto del diesel, pero aumentan al aumentar la proporción de CO₂ en el modo dual. (Ilustraciones 45 y 43).

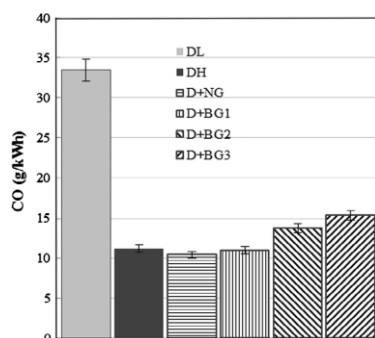


Ilustración 45: Specific CO emissions for diesel and dual fueling (engine speed = 1750 rpm; torque = 3 N m (DL) and 28 N m for others; injection at 28°bTDC). [Mustafi, 2013]

5.5.3 Hidrocarburos sin quemar

En la Ilustración 43 cuando aumenta la carga disminuyen las emisiones de HC, para todas las combinaciones de combustibles tanto en modo único como en modo dual. Hay una relación exponencial entre el aumento de hidrocarburos sin quemar y el retraso en la ignición, debido a que se inyecta combustible en la aspiración. También este efecto está relacionado con la disminución de la temperatura de combustión y reducción de oxígeno en la mezcla que puede reducir los límites de inflamabilidad. Se puede verificar mediante la Ilustración 46.

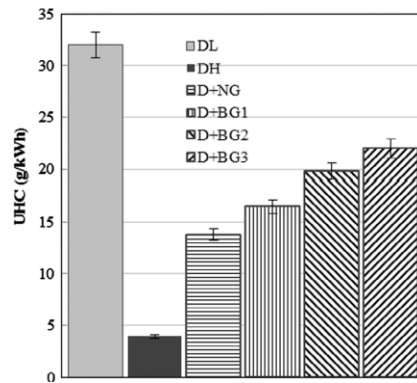


Ilustración 46: Specific unburned hydrocarbon emissions for diesel and dual fueling (enginespeed = 1750 rpm; torque = 3 N m (DL) and 28 N m for others; injection at 28_bTDC). [Mustafi, 2013]

5.5.4 Emisiones de Partículas

Las emisiones de partículas (FSN) mediante combustión dual fueron inferiores a los de los modos de combustible único, especialmente para el biodiesel. Esta reducción se puede atribuir a las propiedades de la ausencia de compuestos aromáticos y el bajo contenido de azufre, ambos son precursores de las emisiones de hollín. Ilustraciones 42 y 47.

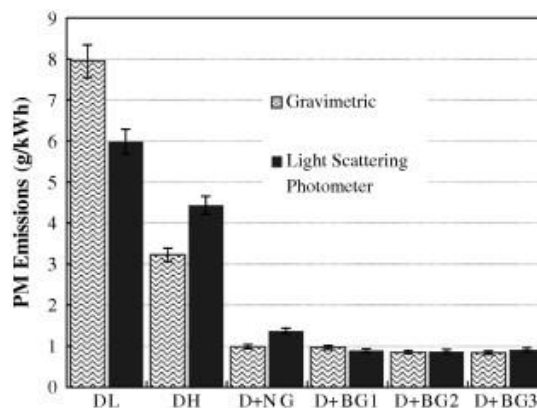


Ilustración 47: Specific PM emissions by LSP method compared with the corresponding gravimetric results for different engine fueling (diesel: 3 N m and 28 N m; dual fuel: 28 N m; 1750 rpm; 28_bTDC; 0.6 kg/h pilot for dual fueling). [Mustafi, 2013]

Finalmente cuanto mayor es el tiempo de ignición, mayor homogeneidad en la mezcla y menor tendencia a la formación de partículas. Se debe tener en cuenta que cuanto mayor es la cantidad de carbono que posee la molécula mayor es la probabilidad de formación de partículas.

Se puede aumentar la oxidación del hollín debido a un aumento de la concentración de oxígeno o radicales libres como los hidroxilos, en los alrededores de la llama.

Al disminuir la temperatura de la llama disminuye la tasa de nucleación del hollín y esto se puede observar cuando se aumenta la relación de CO₂ en la mezcla y disminuye la temperatura de combustión.

6 Conclusiones

6.1 Conclusiones del trabajo

La **biomasa** se aprovecha fundamentalmente estado **líquido** como componente de los combustibles en los MEP (bioetanol y ETBE) y en los MEC (biodiesel), para la primera generación de biocombustibles (proceden solo de semillas vegetales). La segunda generación está en desarrollo, para trabajar en mejorar los procesos que aprovechan la biomasa lignocelulósica mediante procesos denominados BLT (Biomass to Liquid). Los **combustibles gaseosos** de origen renovable "biocombustibles gaseosos" se pueden obtener por diferentes procesos dependientes del origen de la biomasa y por tanto tienen diferentes composiciones químicas en diferentes proporciones como ocurre con el gas de síntesis, pero eso no tiene aplicación en la industria de la Automoción.

Los **gases combustibles en automoción** se pueden clasificar en función de su origen, los fósiles tanto el Gas Licuado del Petróleo (GLP), obtenido por destilación fraccionada de petróleo y que tiene como componentes fundamentales el Propano y el Butano con las siguientes proporciones 70-30% respectivamente. El Gas Natural (GN) es un combustible de origen fósil que tiene una proporción de aproximada de 80% de CH₄, y que para sus aplicaciones finales debe ser transformado para su comercialización o distribución a través de la red de distribución de gas, alcanzando valores de 90-95% de metano.

El **biogás** es un biocombustible gaseoso de origen renovable que se obtiene por la acción de bacterias en medio anaerobio y que su composición más habitual es 65% de CH₄ y el 35% de CO₂, siendo el rendimiento del proceso entorno al 90%. El biogás que puede ser sustituto del GN se le denomina biometano, y puede ser inyectado en la red de gas siempre que se alcancen los valores de las propiedades como combustible de sustitución y de vital importancia es el Índice de Wobbe (indica proporcionalidad a la energía calorífica que pasa por un orificio) y el poder calorífico que depende de la cantidad de metano. Se debe tener en cuenta que el metano es el combustible que menos CO₂ emite debido a su relación C_mH_n, en la combustión. Para estimar la potencia de un motor de combustión interno alternativa (MCIA) alimentado por un gas combustible puede hacerse mediante el parámetro E.F.Q. (Engine Fuel Quality), que refleja la energía por kilogramo de mezcla de aire combustible y que depende del combustible.

Existen diferentes configuraciones para los vehículos alimentados con **biometano**, en el caso de los MEP la configuración más extendida es el vehículo bi-fuel (puede funcionar con biometano exclusivamente), en los MEC el más usado es el dual-fuel que requiere gasóleo para la puesta en funcionamiento del motor frío y se inyecta biometano en el aire de aspiración a medida que aumenta la carga del motor. Cabe mencionar que el biometano es un combustible que presenta todas las garantías de seguridad en cuanto a repostaje y almacenamiento a bordo, suele encontrarse en forma comprimida a 200-250 bar y necesita ser despresurizado y acondicionado a las condiciones de inyección. Para el repostaje existe una forma rápida, aproximadamente 5 minutos donde el gas está previamente almacenado a la presión de suministro, o bien una forma lenta que requiere de menos potencia en los equipos de presión, pero por el contrario requiere más tiempo ya que el gas se comprime a la vez que se suministra.

Se ha puesto de manifiesto una comparativa de un estudio realizado por Moreno publicado en el año 2011 en la que se muestran las emisiones para CO₂, CO, NO_x y HC para un mismo vehículo con diferentes motorizaciones, que son GNC, Gasolina y Diesel, en la que el GNC es el combustible que menos emite para todos los compuestos. (Tabla 9).

Finalmente se analizaron las **prestaciones y emisiones para MEP y MEC utilizando biogás** como combustible y se llega a las siguientes conclusiones para el caso de encendido provocado:

- **El introducir CO₂ provoca:** disminuye la cantidad de metano, aumenta el consumo específico, disminuye la presión máxima en el cilindro, menor emisión de NO_x, aumento de CO en mezclas ricas, la geometría de la inyección y la dirección de flujo no influyen, en mezclas pobres la potencia al freno se mantiene casi constante hasta el valor de 40% de CO₂ después del cual cae con brusquedad (si la mezcla es rica cae constantemente), la mejor relación de compresión se sitúa en 13:1. La eficiencia térmica se mantiene casi constante.
- **Las emisiones de NO_x:** aumentan al aumentar la relación de compresión, al añadir H₂ a la mezcla aumenta la temperatura y por tanto la emisión de óxidos de nitrógeno.
- **Las emisiones de CO:** aumentan al aumentar la relación de compresión.
- **Las emisiones de HC:** aumentan si no son relaciones estequiométricas.
- **Introducir H₂:** aumenta la potencia, aumenta la eficiencia, aumentan las emisiones de óxidos de nitrógeno y disminuyen los HC.

Al analizar un **MEP que trabaja con biogás** se llega a las siguientes conclusiones:

- Motores robustos fiables y eficientes, alta eficiencia térmica, bajas emisiones de HC y CO
- **Aumentan la temperatura de los gases de escape con el grado de carga**
- **La sustitución de un combustible gaseoso por diesel:** disminuye el tiempo de combustión.
- **La Presión máxima en el cilindro:** es independiente del tipo de combustible, sin embargo puede apreciarse un retraso en la ignición.
- **Las emisiones de NO_x:** Se reducen con la cantidad de combustible introducido, pudiendo llegar hasta el 70%.
- **Las emisiones de CO:** a carga baja del motor son altas y viceversa, aumentan al aumentar la cantidad de CO₂ introducida
- **Las emisiones de HC:** Tienen una relación exponencial con el retraso de la ignición (porque se inyecta combustible en la aspiración, y menor temperatura de combustión, cuanto más biogás mayor retraso en la ignición).
- **Partículas:** disminuyen cuanto mayor es el retraso de la ignición (mayor homogeneidad).

6.2 Sugerencias para trabajos futuros

A pesar de que la tecnología en combustibles gaseosos está madura, en el caso de los biocombustibles gaseosos, hay una segunda generación de procesos que se pueden mejorar, para la obtención de combustibles como son los referidos a reformados catalíticos del tipo biomasa a líquido (BTL).

Hay una gran variedad de aprovechamiento de la biomasa, en el caso particular de biogás, se necesita una mayor implicación e iniciativa por parte de las Autoridades para hacerlo más accesible al público en general, ya que apenas se encuentran estaciones de servicio donde repostar GNC o biogás enriquecido y en España todavía no se inyecta a la red de Gas Natural, al contrario que en otros países de la UE.

A pesar de que la industria Automovilística es muy tecnológica, es importante abrir líneas de investigación con nuevos compuestos y procesos que se puedan sintetizar siendo muy valorable aquellos que puedan ser de origen renovable.

7 Bibliografía

ARROYO, J., et al. Efficiency and Emissions of a Spark Ignition Engine Fueled with Synthetic Gases obtained from Catalytic Decomposition of Biogas. *International Journal of Hydrogen Energy*, 3/27, 2013, vol. 38, no. 9. pp. 3784-3792. ISSN 0360-3199.

CASTAÑO V., DOMINGUEZ J.I. Motores de transporte por carretera. Cidaut. 2010.

CERDEIRA F. Combustión de combustibles sólidos, líquidos y gaseosos. Uvigo, 2013

CHANDRA, R., et al. Performance Evaluation of a Constant Speed IC Engine on CNG, Methane Enriched Biogas and Biogas. *Applied Energy*, 11, 2011, vol. 88, no. 11. pp. 3969-3977. ISSN 0306-2619.

CROOKES, R. J. Comparative Bio-Fuel Performance in Internal Combustion Engines. *Biomass and Bioenergy*, 5, 2006, vol. 30, no. 5. pp. 461-468. ISSN 0961-9534.

HUANG, Jingdang; and CROOKES, R. J. Assessment of Simulated Biogas as a Fuel for the Spark Ignition Engine. *Fuel*, 12, 1998, vol. 77, no. 15. pp. 1793-1801. ISSN 0016-2361.

KORAKIANITIS, T.; NAMASIVAYAM, A. M. and CROOKES, R. J. Natural-Gas Fueled Spark-Ignition (SI) and Compression-Ignition (CI) Engine Performance and Emissions. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2, 2011, vol. 37, no. 1. pp. 89-112. ISSN 0360-1285.

LAPUERTA M. Combustibles. Payri y Desante. *Motores de Combustión Interna Alternativos*, Ed. Reverte, 2011.

MATHAI, Reji, et al. Comparative Evaluation of Performance, Emission, Lubricant and Deposit Characteristics of Spark Ignition Engine Fueled with CNG and 18% Hydrogen-CNG. *International Journal of Hydrogen Energy*, 4, 2012, vol. 37, no. 8. pp. 6893-6900. ISSN 0360-3199.

MELGAR A. Biocombustibles gaseosos. Uvigo. 2013

MORENO J.J. Gas natural como combustible alternativo en vehículos. UPC. 2011

MUSTAFI, Nirendra N.; RAINE, Robert R. and VERHELST, Sebastian. Combustion and Emissions Characteristics of a Dual Fuel Engine Operated on Alternative Gaseous Fuels. *Fuel*, 7, 2013, vol. 109, no. 0. pp. 669-678. ISSN 0016-2361.

OMIL F. Tecnología Medioambiental. USC. 2003

ORTIZ L. Procesos de transformación de la biomasa. Uvigo. 2013

PAPAGIANNAKIS, R. G., et al. Emission Characteristics of High Speed, Dual Fuel, Compression Ignition Engine Operating in a Wide Range of Natural gas/diesel Fuel Proportions. *Fuel*, 7, 2010, vol. 89, no. 7. pp. 1397-1406. ISSN 0016-2361.

PASCUAL A., FERNÁNDEZ B. Situación Potencial de generación de Biogás. IDAE. 2011

PORPATHAM, E.; RAMESH, A. and NAGALINGAM, B. Effect of Compression Ratio on the Performance and Combustion of a Biogas Fuelled Spark Ignition Engine. *Fuel*, 5, 2012, vol. 95, no. 0. pp. 247-256. ISSN 0016-2361.

PRIETO R. El sector del gas natural. CNE-Uvigo. 2013

RODRÍGUEZ P. Pilas de Combustible. Auditorías energéticas. Energea Biosconsultores. 2013

SÁNCHEZ F., SEGOVIA M. Tecnologías vehículo eléctrico. CTAG. 2013

Seung Hyun; and LEE, Chang Sik. Experimental Investigation on the Combustion and Exhaust Emission Characteristics of biogas-biodiesel Dual-Fuel Combustion in a CI Engine. *Fuel Processing Technology*, 5, 2011, vol. 92, no. 5. pp. 992-1000. ISSN 0378-3820.

Singh S, Krishnan SR, Srinivasan KK, Midkiff KC, Bell SR. Effect of pilot injection timing, pilot quantity and intake charge conditions on performance and emissions for an advanced low-pilot-ignited natural gas engine. *Int J Eng Res* 2004;5:329-48.

SUBRAMANIAN, K. A., et al. Comparative Evaluation of Emission and Fuel Economy of an Automotive Spark Ignition Vehicle Fuelled with Methane Enriched Biogas and CNG using Chassis Dynamometer. *Applied Energy*, 5, 2013, vol. 105, no. 0. pp. 17-29. ISSN 0306-2619.

VÁZQUEZ M.E. Cogeneración. Auditorías energéticas. UVigo. 2013

TEODORITA AI S., Rutz D. Prassl H. *Biogas handbook*. 2008

TINAUT F.V. Sistemas de propulsión y combustibles alternativos, medio ambiente y reglamentación. Uva. 2011a

TINAUT F.V. Jornadas Gasificación. Elcogas-UVA. 2013

TINAUT, F. Requerimientos y formación de la mezcla en MEP. Payri y Desante. *Motores de Combustión Interna Alternativos*, Ed. Reverte, 2011b.

8 Anexos

Índice de Ecuaciones

ECUACIÓN 1: ÍNDICE DE WOBBE	11
ECUACIÓN 2: ECUACIÓN PARA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS.....	14
ECUACIÓN 3: POTENCIA DE UN MOTOR.....	16
ECUACIÓN 4: ECUACIÓN PARA DOSADO EN MCIA.....	16
ECUACIÓN 5: ECUACIÓN DEL RENDIMIENTO DE UN MCIA EN FUNCIÓN DEL DOSADO	17
ECUACIÓN 6: ECUACIÓN DEL RENDIMIENTO VOLUMÉTRICO.....	17
ECUACIÓN 7: POTENCIA DE UN MCIA.....	17
ECUACIÓN 8: ECUACIÓN PARA EL COEFICIENTE C.....	17
ECUACIÓN 9: RENDIMIENTO DE UN MCIA EN FUNCIÓN DE PARÁMETROS DE DISEÑO, OPERACIÓN Y EFQ	17
ECUACIÓN 10: PARÁMETRO DE DISEÑO	17
ECUACIÓN 11: PARÁMETRO DE OPERACIÓN	17
ECUACIÓN 12: EFQ (ENGINE FUEL QUALITY).....	17
ECUACIÓN 13: EFQ EN FUNCIÓN DE PODER CALORÍFICO Y LA DENSIDAD	18
ECUACIÓN 14: RENDIMIENTO DEL MOTOR EN FUNCIÓN DEL PODER CALORÍFICO VOLUMÉTRICO DE LA MEZCLA ADMITIDA	18
ECUACIÓN 15: ECUACIÓN GENÉRICA PARA DETERMINAN LA COMPOSICIÓN DE LA COMBUSTIÓN DE BIOMASA	19
ECUACIÓN 16: ECUACIÓN GENÉRICA PARA DETERMINAN DEL DOSADO ESTEQUIOMÉTRICO DE LA COMBUSTIÓN DE BIOMASA	19
ECUACIÓN 17: ECUACIÓN GENÉRICA PARA DETERMINAR EL PODER CALORÍFICO DE LA COMBUSTIÓN DE BIOMASA	19
ECUACIÓN 18: ECUACIÓN GENÉRICA PARA DETERMINAR EL PESO MOLECULAR DE LA COMBUSTIÓN DE BIOMASA.....	19

Índice de Ilustraciones

ILUSTRACIÓN 1: CLASIFICACIÓN DE LOS COMBUSTIBLES EN AUTOMOCIÓN (ELABORACIÓN PROPIA)	4
ILUSTRACIÓN 2: ESQUEMA BÁSICO DE UNA REFINERÍA (PROCESOS DE QUÍMICA INDUSTRIAL; USC, 2003)	5
ILUSTRACIÓN 3: FRACCIONES DE DESTILACIÓN POR ORDEN DE VOLATILIDAD Y LONGITUD DE LAS CADENAS. [CERDEIRA, 2013].....	6
ILUSTRACIÓN 4: MÉTODOS DE PRODUCCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES [TINAUT, 2011b]	16
ILUSTRACIÓN 5: TRATAMIENTO ANAERÓBIO CON SULFATOS [OMIL, 2003].....	23
ILUSTRACIÓN 6: BALANCES DE UN REACTOR ANAERÓBIO[OMIL, 2003]	23
ILUSTRACIÓN 7: APLICACIONES DEL BIOGÁS	24
ILUSTRACIÓN 8: DISTRIBUCIÓN DE LA RED DE GAS EN ESPAÑA.....	30
ILUSTRACIÓN 9: VEHÍCULO CON PILA DE COMBUSTIBLE ALIMENTADO DE HC LÍQUIDO Y PROCESADO A BORDO. [TINAUT, 2011A]	31
ILUSTRACIÓN 10: ESQUEMA DE VEHÍCULO CON COMBUSTIBLE GASEOSO (GNC O BIOGÁS)	32
ILUSTRACIÓN 11: ESTACIÓN DE CARGA ESTÁNDAR. [FUENTE GAS NATURAL FENOSA]	35
ILUSTRACIÓN 12: MODIFIED INDIAN DRIVING CYCLE (MIDC). [SUBRAMANIAN, 2013].....	39
ILUSTRACIÓN 13: EMISIONES PARA OPEL ZAFIRA ALIMENTADO CON GNC, GASOLINA, Y DIESEL. [MORENO, 2011].....	41
ILUSTRACIÓN 14: BRAKE POWER AND BTE WITH CO ₂ FRACTION IN MIXTURE AT 2000 R/MIN, CR=13. [HUANG 1998]	44
ILUSTRACIÓN 16: VARIATION OF BIOGAS FLOW WITH THE INCREASE OF CARBON DIOXIDE IN BIOGAS. [BARI, 1996]	45
ILUSTRACIÓN 18: PRESIÓN MÁXIMA EN LA CÁMARA DE COMBUSTIÓN, RESPECTO DE PORCENTAJE DE CO ₂ . [HUANG 1998].....	45
ILUSTRACIÓN 19: PRESIÓN MÁXIMA EN LA CÁMARA DE COMBUSTIÓN, RESPECTO DE RELACIÓN COMPRESIÓN. [HUANG 1998].....	46
ILUSTRACIÓN 20: VARIATION BMEP AND BTE WITH COMPRESSION RATIOS AT 2500 R/MIN, RAFR=0.97, CO ₂ =37.5%. [HUANG 1998]	46
ILUSTRACIÓN 21: VARIATION OF EXHAUST GAS TEMPERATURE WITH EQUIVALENCE RATIO AT FULL THROTTLE. [PORPATHAM 2012]	47
ILUSTRACIÓN 22: VARIATION BMEP AND BTE WITH ENGINE SPEED, CO ₂ =38%. [HUANG 1998]	47
ILUSTRACIÓN 23: BRAKE POWER DEVELOPED BY THE ENGINE ON SELECTED FUELS. [CHANDRA 2011]	48
ILUSTRACIÓN 24: VARIATION OF BRAKE POWER WITH EQUIVALENCE RATIO. [PORPATHAM, 2007]	48
ILUSTRACIÓN 25: VARIATION OF BRAKE THERMAL EFFICIENCY WITH EQUIVALENCE RATIO. [PORPATHAM, 2007]	48
ILUSTRACIÓN 27: VARIATION WITH RELATIVE AIR:FUEL RATIO OF EXHAUST EMISSIONS FOR NATURAL GAS. [CROOKES 2006]	49
ILUSTRACIÓN 28: VARIATION OF EXHAUST GAS EMISSIONS WITH CO ₂ FRACTION IN MIXTURE AT 2000 R/MIN, CR=13. [HUANG 1998]	50
ILUSTRACIÓN 29: VARIATION OF EXHAUST GAS EMISSIONS WITH COMPRESSION RATIOS AT 2500 R/MIN, RAFR=0.97, CO ₂ =37.5%. [HUANG 1998]	50
ILUSTRACIÓN 30: EFFECT OF BIO-GAS CARBON DIOXIDE FRACTION ON BRAKE-SPECIFIC OXIDES OF NITROGEN. 2000 RPM. CR= 11:1 [CROOKES 2006]	50
ILUSTRACIÓN 31: EFFECT OF BIO-GAS COMPOSITION ON BRAKE-SPECIFIC OXIDES OF NITROGEN AND SPECIFIC FUEL CONSUMPTION WITH NITROGEN ADDITION. 2000 RPM. CR= 11:1 [CROOKES 2006].....	51
ILUSTRACIÓN 32: EFFECT OF BIO-GAS COMPOSITION ON BRAKE-SPECIFIC CARBON MONOXIDE AND UNBURNT HYDROCARBONS WITH NITROGEN ADDITION. 2000 RPM. CR= 11:1 [CROOKES 2006].....	51
ILUSTRACIÓN 33: VARIATION IN BSFC DURING ENDURANCE TESTS. [REJI, 2011]	51
ILUSTRACIÓN 34: VARIATION OF NITRIC OXIDE EMISSION WITH EQUIVALENCE RATIO. [PORPATHAM, 2007].....	51
ILUSTRACIÓN 35: EFFECT OF CARBON DIOXIDE FRACTION ON BRAKE SPECIFIC-CARBON MONOXIDE AND UNBURNT HYDROCARBONS, 2000 RPM, CR 11:1. [CROOKES 2006].....	52
ILUSTRACIÓN 36: EFFECT OF COMBUSTION MODE AND ENGINE LOAD ON BRAKE THERMAL EFFICIENCY. [SEUNG, 2011].....	53
ILUSTRACIÓN 37: EFFECT OF COMBUSTION MODE ON EXHAUST GAS TEMPERATURE VS LOAD. [SEUNG, 2011].....	53
ILUSTRACIÓN 38: EFFECT OF COMBUSTION MODE AND ENGINE LOAD ON FUEL CONSUMPTION OF PILOT FUEL (ULSD, BIODIESEL) AT CONSTANT GAS FLOW AND TOTAL BSFC. [SEUNG, 2011]	53
ILUSTRACIÓN 40: CYLINDER PRESSURE AS A FUNCTION OF CRANK ANGLE FOR: (A) DIESEL AND DUAL FUELING AND (B) DUAL FUELING (28 N M; AT 1750 RPM AND 28°BTDC). [MUSTAFAI, 2013].....	54
ILUSTRACIÓN 41: (A) BRAKE SPECIFIC FUEL CONSUMPTION, AND (B) BRAKE SPECIFIC ENERGY CONSUMPTION OF THE ENGINE WHILE OPERATED WITH DIESEL AND DUAL FUELS (DL 3 NM, DH AND DUAL FUELING 28 N M, AT 1750 RPM, AND 28°BTDC). [MUSTAFAI, 2013]	54
ILUSTRACIÓN 42: HC AND CO EMISSIONS UNDER SINGLE AND DUAL-FUEL MODES VERSUS ENGINE LOAD. [SEUNG, 2011]	55
ILUSTRACIÓN 43: CONCENTRATIONS OF NOX AND SOOT EMISSIONS UNDER SINGLE AND DUAL-FUEL MODES VERSUS ENGINE LOAD. [SEUNG, 2011]	55
ILUSTRACIÓN 44: CONCENTRATIONS SPECIFIC NOX EMISSIONS FOR DIESEL AND DUAL FUELING (ENGINE SPEED = 1750 RPM; TORQUE = 3 N M (DIESEL LOW LOAD) AND 28 N M FOR OTHERS; INJECTION AT 28°BTDC). [MUSTAFAI, 2013]	56
ILUSTRACIÓN 45: SPECIFIC CO EMISSIONS FOR DIESEL AND DUAL FUELING (ENGINE SPEED = 1750 RPM; TORQUE = 3 N M (DL) AND 28 N M FOR OTHERS; INJECTION AT 28°BTDC). [MUSTAFAI, 2013]	56

ILUSTRACIÓN 46: SPECIFIC UNBURNED HYDROCARBON EMISSIONS FOR DIESEL AND DUAL FUELING (ENGINESPEED = 1750 RPM; TORQUE = 3 NM (DL) AND 28 N M FOR OTHERS; INJECTION AT 28_BTDC). [MUSTAFAI, 2013]	57
ILUSTRACIÓN 47: SPECIFIC PM EMISSIONS BY LSP METHOD COMPARED WITH THE CORRESPONDING GRAVIMETRIC RESULTS FOR DIFFERENT ENGINE FUELING (DIESEL: 3 N M AND 28 N M; DUAL FUEL: 28 N M; 1750 RPM; 28_BTDC; 0.6 KG/H PILOT FOR DUAL FUELING). [MUSTAFAI, 2013]	57

Índice de Tablas

TABLA 1: PROCESOS, TECNOLOGÍAS Y APLICACIONES DE LA BIOMASA. [MELGAR 2013].....	13
TABLA 2: VALORES DE COMBUSTIBLES PARA SU CARACTERIZACIÓN EN MCIA	18
TABLA 3: VALORES DE PM Y PODER CALORÍFICO PARA REACTIVOS Y PRODUCTOS EN UNA COMBUSTIÓN GENÉRICA DE BIOMASA.....	19
TABLA 4: CARACTERIZACIÓN DEL SUSTRATO [MELGAR 2013]	22
TABLA 5: COMPOSICIÓN DEL BIOGÁS [ARROYO, 2013]	23
TABLA 6: ESPECIFICACIONES DE CALIDAD DEL GAS NATURAL EN LOS PUNTOS DE ENTRADA DEL SISTEMA GASISTA. [PRIETO 2013]	29
TABLA 7: POTENCIA MOTOR PARA COMBUSTIBLES CONOCIENDO SU DOSADO Y SU PODER CALORÍFICO (ELABORACIÓN PROPIA)	38
TABLA 8: COMPARACIÓN DE EMISIONES ENTRE CICLO URBANO Y EXTRAURBANO. [SUBRAMANIAM, 2013]	40
TABLA 9: EMISIONES PARA VEHÍCULOS EQUIVALENTES CON GNC, GASOLINA, Y DIESEL. [MORENO, 2011]	40
TABLA 10: CONSUMOS Y COSTES VEHÍCULO FIAT PUNTO ALIMENTADO CON GNC, GASOLINA, Y DIESEL. [ELABORACIÓN PROPIA] ...	41
TABLA 11: PROPERTIES OF THE LIQUID TEST FUELS AND BIOGAS. [SEUNG, 2011].....	53