



INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA  
**PASCUAL BRAVO**  
Acreditados en Alta Calidad

# Estudio de un motogenerador dual con biodiésel, gas natural e hidrógeno

Conceptos y aplicación

Andrés David Morales Rojas  
Óscar José Arcila Igrorio  
Ánderson Gallego Montoya  
Luis Carlos Olmos Villalba



INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA  
**PASCUAL BRAVO®**

Acreditados en Alta Calidad

# Estudio de un motogenerador dual con biodiésel, gas natural e hidrógeno

Conceptos y aplicación

621.436 E82 Estudio de un motogenerador dual con biodiésel, gas natural e hidrógeno : conceptos y aplicación / por Andrés David Morales Rojas, Óscar José Arcila Igirio, Anderson Gallego Montoya, Luis Carlos Olmos Villalba  
Medellín: IUPB. Fondo Editorial Pascual Bravo, 2024  
73 p. : il. -- (Serie Investigación)

ISBN 978-628-95888-8-0

1. MOTORES DIÉSEL
2. BIODIÉSEL
3. EMISIÓN DE GASES
4. GASES DE EFECTO INVERNADERO
5. EFICIENCIA ENERGÉTICA
6. EFICIENCIA TÉRMICA
7. MOTORES DE ENCENDIDO POR COMPRESIÓN
8. COMBUSTIBLES DIÉSEL

Catalogación en la publicación Biblioteca de Ciencia y Tecnología

## **Estudio de un motogenerador dual con biodiésel, gas natural e hidrógeno Conceptos y aplicación**

Serie Investigación  
Institución Universitaria Pascual Bravo

Primera edición: 2024  
ISBNe: 978-628-95888-8-0

### **Autores**

Andrés David Morales Rojas,  
Óscar José Arcila Igirio,  
Anderson Gallego Montoya,  
Luis Carlos Olmos Villalba

Grupo de Investigación e Innovación en Energía - GIEN  
Facultad de Ingeniería

Coordinación editorial: Johana Martínez Ramírez  
Corrección de textos: María Edilia Montoya Loaiza  
Diagramación: Leonardo Sánchez Perea

Editado en Medellín, Colombia  
Fondo Editorial Pascual Bravo  
Institución Universitaria Pascual Bravo  
Calle 73 No. 73A – 226 – Tel. (604) 4480520  
fondoeditorial@pascualbravo.edu.co  
www.pascualbravo.edu.co  
Medellín – Colombia

Las ideas expresadas en la obra aquí contenida son manifestaciones del pensamiento individual de sus autores; en esa medida, no representan el pensamiento de la Institución Universitaria Pascual Bravo, siendo ellos los únicos responsables por los eventuales daños o perjuicios que pudieran causar con lo expresado o por la vulneración de los derechos de autor de terceros en los que hubiesen podido incurrir en su creación.



Está prohibido todo uso de la obra que atente contra los derechos de autor y el acceso abierto. Esta obra está protegida a través de la licencia Creative Commons: Reconocimiento-No comercial 4.0 Internacional.

# Contenido

<b>Abreviaturas</b>	<b>5</b>
<b>Parámetros y variables</b>	<b>6</b>
<b>Letras griegas</b>	<b>7</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>8</b>
<b>2. Descripción y ciclo de utilización de los combustibles de interés</b>	<b>12</b>
<b>3. Configuración del montaje experimental y proceso de medición de variables</b>	<b>17</b>
<b>4. Descripción de la metodología de cálculo</b>	<b>22</b>
<b>5. Aplicación de la metodología de cálculo al uso de biodiésel y gas natural enriquecido con hidrógeno</b>	<b>54</b>
<b>6. Conclusiones</b>	<b>60</b>
<b>7. Agradecimientos</b>	<b>62</b>
<b>Glosario de palabras</b>	<b>63</b>
<b>Referencias</b>	<b>67</b>

# Glosario

## Abreviaturas

C	— Carbono atómico
CH <sub>4</sub>	— Metano
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	— Etano
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	— Propano
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	— Butano
CO	— Monóxido de carbono
CO <sub>2</sub>	— Dióxido de carbono
EGR	— Recirculación de gases de escape
GLP	— Gas licuado de petróleo
GN	— Gas natural
H	— Hidrogeno atómico
H <sub>2</sub>	— Hidrógeno molecular
HC	— Hidrocarburos sin quemar
MCI	— Motores de combustión interna
MEC	— Motores de encendido por compresión
N	— Nitrógeno atómico
N <sub>2</sub>	— Nitrógeno molecular
NO <sub>x</sub>	— Óxidos de nitrógeno
O	— Oxigeno atómico
O <sub>2</sub>	— Oxígeno molecular
MP	— Material particulado
S	— Azufre atómico
SO <sub>x</sub>	— Óxidos de azufre
ZNI	— Zonas no interconectadas

## Parámetros y variables

$\%CO_{2,max}$	— Porcentaje de $CO_2$ máximo
$\%S_e$	— Porcentaje de sustitución energético [%]
$\%S_m$	— Porcentaje de sustitución másico [%]
$(A/F)_{th}$	— Relación aire/combustible estequiométrica [ $kg_{aire}/kg_{comb}$ ]
$(A/F)_r$	— Relación aire/combustible real [ $kg_{aire}/kg_{comb}$ ]
$\dot{m}_i$	— Flujo másico de combustible [ $kg_i/s$ ]
$\dot{V}_i$	— Flujo volumétrico de combustible [ $m_i^3/s$ ]
$V_{aire,r}$	— Volumen de aire real [ $m^3_{aire}/m^3_{comb}$ ]
$\Delta\hat{h}_{s,R}$	— Cambio de entalpía sensible [ $kJ/kmol$ ]
$h_{fg}$	— Entalpía de vaporización del agua [ $kJ/kg$ ]
$M_{H_2}$	— Masa molecular del hidrógeno [ $kg_{H_2}/kmol_{H_2}$ ]
$M_{bio}$	— Masa molecular del biodiésel [ $kg_{bio}/kmol_{bio}$ ]
$M_{eq}^*$	— Masa molecular equivalente [ $kg_{bio}/kmol_C$ ]
$M_{GN}$	— Masa molecular del gas natural [ $kg_{GN}/Kmol_{GN}$ ]
$M_i^*$	— Masa de cada elemento por kmol de carbono [ $kg_i/kmol_C$ ]
$N_{i,P}$	— Número de moles de los productos [ $kmol_{i,P}$ ]
$N_{i,R}$	— Número de moles de los reactivos [ $kmol_{i,R}$ ]
$N_i^*$	— Relación de moles de cada elemento con relación al carbono [ $kmol_i/kmol_C$ ]
$p_{adm}$	— Presión de admisión [ $kPa$ ]
$R_u$	— Constante de gas ideal [ $kJ/kmol \cdot K$ ]
$T_{adm}$	— Temperatura de admisión [ $^{\circ}C$ ]
$v_i$	— Fracción volumétrica [ $m_i^3/m^3_{comb}$ ]
$x_i$	— Fracción molar [ $kmol_i/kmol_{comb}$ ]
$y_i$	— Fracción másica [ $kg_i/kg_{comb}$ ]
$I_i$	— Índices de emisión [ $g_i/kW_e h$ ]
$P_e$	— Potencia eléctrica [ $kJ/s$ ]
$P_t$	— Potencia química [ $kJ/s$ ]

$T_{ad}$	— Temperatura de llama adiabática [°C]
$PCI_i$	— Poder calorífico inferior [ $kJ / kg_i$ ]
$PCS_i$	— Poder calorífico superior [ $kJ / kg_i$ ]
$-Q$	— Calor de reacción [ $kJ$ ]
SFC	— Consumo específico de combustible [ $g_{comp} / kW_e-h$ ]

## Letras griegas

$\eta_t$	— Eficiencia térmica [%]
$\rho_i$	— Densidad [ $kg / m^3$ ]
$\emptyset$	— Dosado relativo [-]

## 1. Introducción

Los motores de encendido por compresión (en adelante, MEC) son una tecnología que sigue el ciclo Diésel como principio básico de operación; se caracterizan, porque se usan típicamente como fuente motriz en el sector transporte, en la generación eléctrica, en maquinaria agrícola, en transporte marítimo, en submarinos, entre otros [1]. Su principal ventaja, en comparación con otras tecnologías, como los motores que operan mediante el ciclo Otto, es su alta eficiencia térmica, su durabilidad y una mayor economía [2]. No obstante, en la actualidad esta tecnología se enfrenta a algunas regulaciones gubernamentales como, por ejemplo, las presentadas por la normativa europea de emisiones (Euro), las cuales surgen con el ánimo de regular los niveles de emisión de gases contaminantes, producto de la combustión de los combustibles de origen fósil [3].

Las emisiones que representan la mayor preocupación en la operación de los MEC son las de óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ), el material particulado (MP), los óxidos de azufre ( $\text{SO}_x$ ), los hidrocarburos sin quemar (HC) y el monóxido de carbono (CO), debido a su efecto nocivo para la salud pública y el medio ambiente [4], razón por la cual surgen algunas tecnologías que apuntan a la mitigación de estas emisiones, tales como la recirculación de gases de escape (EGR) [5], turbocompresores de geometría variable [2], sistemas de reducción catalítica selectiva [6], uso de combustibles alternativos [7] y [8], para citar algunos. Como consecuencia, el sector de los MEC es uno de los más activos en investigación e innovación tecnológica, ya que capta la atención de investigadores que buscan mejorar las características de los motores, incluidas las relacionadas con la ecología, la economía y el rendimiento.

Actualmente, la operación de los MEC, en modo dual, es bien conocida en la literatura [9], dado que el uso de combustibles gaseosos incrementa la reactividad de la mezcla aire y combustible al interior de la cámara de combustión mejorando así algunos parámetros de operación y de emisiones [10]. Uno de los combustibles más estudiados en este modo de operación es el gas natural (GN); hoy en día es usado ampliamente en los sectores doméstico, industrial y de transporte, y aunque el GN está principalmente compuesto de metano ( $\text{CH}_4$ ), es considerado como una opción a los hidrocarburos más pesados, debido a que su uso puede ayudar a reducir las emisiones de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), MP y, en algunos casos,  $\text{NO}_x$  [11]. Un MEC operando en modo dual con gas natural, regularmente admite este

combustible a través del múltiple de admisión, allí se forma una mezcla con el aire y entra a la cámara de combustión donde se espera que entre en ignición gracias a la inyección de diésel como combustible piloto; esto permite que el motor use una cantidad menor de diésel, mientras mantiene su potencia de salida. Además, el uso de GN es propicio como estrategia para suplir la deficiencia de combustible en zonas pobres de la cámara de combustión, por cuanto puede favorecer la mezcla de aire y combustible durante la fase de compresión [12].

Los MEC que operan en modo dual ofrecen varios beneficios, incluida una mayor eficiencia de transformación energética, menores emisiones y costos operativos [13], [14]. De hecho, la operación dual en los MEC ha sido ampliamente estudiada como una alternativa tecnológica más sostenible y eficiente en el sector del transporte y en la generación de energía eléctrica. Así pues, el uso de GN puede reducir el consumo de combustible líquido hasta en un 85% [15], generar reducciones de 74% del material particulado y del 54% de  $\text{NO}_x$ , las cuales son 35% menores a las exigidas en los estándares de emisiones europeos, todo con un porcentaje de sustitución de solo 40% [16]. Adicionalmente, se han evidenciado porcentajes de sustitución del diésel de hasta un 60% en un MEC que usaba GN como combustible primario [17].

La combustión dual también admite el uso de combustibles líquidos y gaseosos de origen renovable [18] - [20]; por ejemplo, en R. Jatoth *et al.* [21] analizaron el efecto de una mezcla GN y éster metílico de aceite oleosa mezclado con triacetina, sobre las emisiones, los parámetros de combustión y el rendimiento de un MEC. Los resultados de la investigación revelaron que esta combinación de combustibles puede reducir alrededor de un 10,24% las emisiones de CO y  $\text{NO}_x$ ; concluyeron que es posible obtener un alto rendimiento y bajas emisiones, mediante la implementación de un sistema de combustible dual, utilizando una mezcla de GN y triacetina. No obstante, se encuentran resultados contrarios, como el estudio realizado acerca de la operación en modo dual de un MEC, utilizando como combustible gaseoso el gas licuado de petróleo (GLP) [22]. Los investigadores obtuvieron como resultado una disminución de la eficiencia del motor en un 5%, en comparación con el modo diésel, efecto que atribuyeron a la menor capacidad de detonación que tiene el GLP, en comparación con el diésel; además, observaron que el uso dual GLP-diésel permite disminuir en gran medida las emisiones de  $\text{CO}_2$ , reafirmando que «el uso de sistemas duales de generación permite

diversificar la canasta energética, disminuir las emisiones y ampliar el uso de combustibles alternativos y mezclas líquido-gas» [22].

Por su parte, el hidrógeno ( $H_2$ ) se presenta como una de las principales alternativas tecnológicas dentro de un contexto de transición energética y descarbonización de la economía. El  $H_2$  puede usarse en celdas de combustible para producir electricidad y calor [23], [24], [25]; también se usa como materia prima para la producción de otros combustibles como el metano y las gasolinas sintéticas [26]. Otra opción planteada para introducir el  $H_2$  en la matriz energética es su adición en la red de distribución de GN con hasta un 5% (en%vol.) [26], [27], y su posterior uso en sistemas de combustión y motores que usan GN. Además, se ha encontrado que el uso de GN enriquecido con  $H_2$  tiene beneficios en los sistemas de combustión que lo usan; relacionados con un aumento en la eficiencia de combustión y de la potencia obtenida.

Se han realizado diversos estudios para analizar la combustión de  $H_2$  en MEC; por ejemplo, el trabajo presentado por A. I. Jabbr *et al.* [28], para estudiar las relaciones de potencia, eficiencia y emisiones de  $NO_x$  generadas por la mezcla de GN y  $H_2$ , además de analizar parámetros operativos del motor. La conclusión a la que llegaron fue que la potencia, la eficiencia y las emisiones de  $NO_x$  aumentaban; esta última, debido a las altas temperaturas y presiones dentro del cilindro. De otra parte, el análisis sobre el efecto del uso de  $H_2$  respecto al proceso de combustión, mostró un incremento significativo en la potencia térmica del motor y las tasas de liberación de calor, concluyendo así que el uso de  $H_2$ , aumenta notablemente la eficiencia del motor a medianas y altas cargas; mientras que a bajas cargas la eficiencia tiende a decrecer como consecuencia de la reducción en la eficiencia de combustión. Así mismo, estos investigadores reafirman que el uso del  $H_2$  aumenta la formación de  $NO_x$ , lo cual constituye el problema más determinante en el funcionamiento de los motores diésel en modo dual con  $H_2$ ; es por esto que proponen investigar y evaluar las técnicas de combustión a baja temperatura, enfocadas en reducir estas emisiones, mientras se mantiene la estabilidad de la operación del motor [29].

Considerando lo dicho hasta el momento, el estudio del uso de mezclas GN e  $H_2$  en grupos electrógenos de baja potencia basados en MEC, los cuales son utilizados, principalmente, como equipos de generación eléctrica en zonas no interconectadas (ZNI), proyectos civiles o como respaldo en empresas y hospitales, cobra importancia. El uso del GN como combustible

de transición, y el  $H_2$  como combustible neutro en emisiones de carbono, las ventajas de la combustión dual en motores de combustión interna (MCI) y la posibilidad de usar combustibles de origen renovable como el biodiésel, contribuyen a cumplir los estándares de emisiones impuestos por las normas ambientales, aportan a la descarbonización de la economía y disminuyen la dependencia del uso de combustibles de origen fósil.

En este libro se presenta una metodología para el cálculo del rendimiento y de los índices de emisión de un MEC para microgeneración que opera en modo dual y que usa biodiésel y GN enriquecido con  $H_2$ . Este trabajo permite a los lectores entender los procedimientos de cálculo necesarios para determinar algunas variables de operación de un MEC, tales como el consumo específico de combustible, el nivel de sustitución, la eficiencia térmica y los índices de emisión de gases contaminantes, teniendo en cuenta el consumo de los combustibles —líquido y gaseosos—, la potencia eléctrica generada y las emisiones de  $CO_2$ , CO y  $NO_x$ , en los gases de escape.

Este libro inicia con una descripción teórica de los combustibles usados en las pruebas experimentales; luego, se describen las metodologías de medición experimental y de cálculos para llegar a la composición equivalente del biodiésel —combustible piloto— y de los combustibles gaseosos. Posteriormente, se describen las propiedades más importantes de los combustibles, se realiza un balance de masa, se obtienen las propiedades de combustión y, con esto, se llega al análisis de combustión real. Finalmente, se muestran los resultados del rendimiento e índices de emisión obtenidos a través de la metodología experimental y de cálculo expuesta.

## 2. Descripción y ciclo de utilización de los combustibles de interés

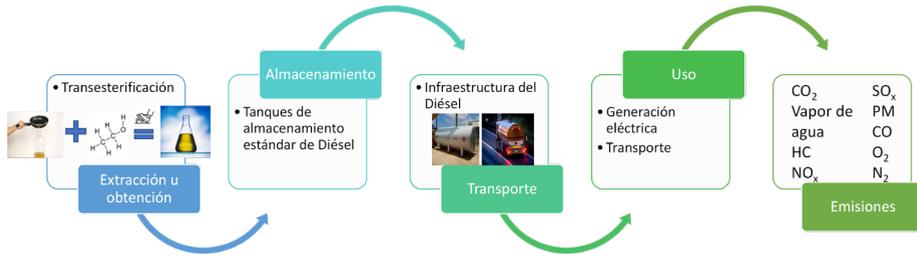
Dentro de la categoría de los combustibles alternativos, se encuentran los biodiésels de origen vegetal y animal, el GN y el H<sub>2</sub>. Estos tienen algo en común, y es que al pasar de los años han sido estudiados como posibles sustitutos de los combustibles convencionales —diésel y gasolina—, con el fin de mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero y solventar la disminución de las reservas de petróleo, atribuida al incremento de la demanda de combustibles en economías emergentes [30]. En este apartado del libro se hace una descripción de los combustibles utilizados, así como de su ciclo de utilización.

Antes de entrar en cada uno de los combustibles, se define lo que se entiende por ciclo de utilización. Cuando nos embarcamos en el contexto de la energía, cualquiera de sus formas tiene un ciclo de utilización; consiste en tres etapas: generación/producción, distribución y consumo [31]. Para un combustible, este ciclo se puede ampliar en extracción, almacenamiento, transporte, uso y emisiones [32]. Lo importante de comprender y analizar cada una de estas etapas, es que ayudan a definir toda una gestión del recurso que permita tener una logística e infraestructura que logre un balance positivo de la relación costo/beneficio.

### 2.1 Biodiésel

El biodiésel producido a partir de aceite de cocina usado, también conocido como biodiésel de aceite vegetal usado o, simplemente, biodiésel, es una alternativa de combustible renovable y sostenible elaborado a partir de aceites que han sido desechados por restaurantes, hogares e industrias relacionadas con la alimentación. El aceite de cocina usado es recolectado, filtrado y procesado químicamente para eliminar impurezas y convertirlo en una fuente de combustible que puede ser utilizado en MEC. En la figura 1 se presenta el proceso de obtención del biodiésel a partir de la transesterificación del aceite de cocina usado, hasta su uso final, y las emisiones generadas a partir de su combustión. Unas de las limitantes que actualmente se presenta para sustituir el diésel con biodiésel, teniendo en cuenta los resultados en rendimiento presentados en la introducción, es la capacidad de producción de este combustible alternativo para suplir la demanda actual [33], [34].

**Figura 1**  
*Ciclo de utilización del biodiésel de aceite de cocina usado*



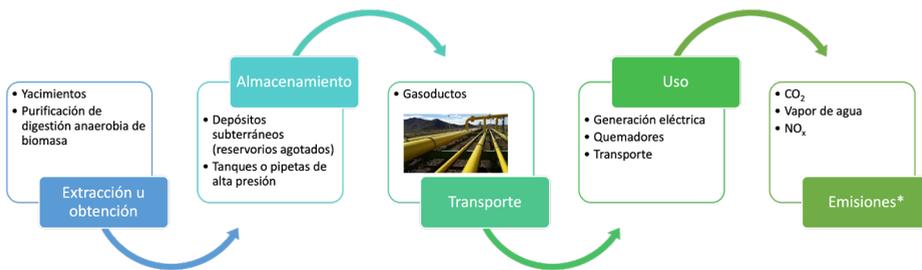
El biodiésel es considerado una forma de biocombustible, porque está elaborado de materia orgánica que, bien se sabe, es renovable y sostenible. Es una opción de combustible amigable con el medio ambiente, porque emite niveles más bajos de gases de efecto invernadero y MP, en comparación con el combustible diésel tradicional [21]. La razón de esta disminución, se atribuye a la presencia de más oxígeno en el biodiésel, lo que ayuda a mejorar el proceso de combustión [35], [36]. Además, el uso de aceite de cocina usado como fuente de combustible, reduce la cantidad de residuos que, de otro modo, terminarían en vertederos o vías fluviales.

Algunos estudios revelan que el uso de aceite residual vegetal genera una disminución significativa en la emisión de gases contaminantes —CO, SO<sub>x</sub>, HC, entre otros—; sin embargo, su calidad e impacto ambiental está delimitado por las condiciones y la cantidad de alcohol que se utilice durante la reacción en el proceso de transesterificación [37]. Hoy en día, el biodiésel está regulado por una rígida legislación nacional e internacional, la cual trata de definir la composición química, sus propiedades termofísicas, su calidad, el valor de venta, entre otras características [38]. Ello se debe a que el biodiésel debe cumplir algunos estándares antes de ser considerado apropiado para su uso en motores, ya sea que se use solo o mezclado con diésel [39]. Los términos exigen conocer la temperatura y tiempo de reacción, masa molar, composición del aceite vegetal, concentración de alcohol, tipo de alcohol, tipo y concentración del catalizador, velocidad de mezclado, contenido de ácidos grasos y concentración de humedad [40].

## 2.2 Gas natural

El gas natural es un combustible fósil compuesto, principalmente, de  $\text{CH}_4$ , con pequeñas cantidades de otros hidrocarburos, como etano ( $\text{C}_2\text{H}_6$ ), propano ( $\text{C}_3\text{H}_8$ ) y butano ( $\text{C}_4\text{H}_{10}$ ). Se encuentra en lo profundo de la corteza terrestre y, a menudo, en asociación con otros combustibles fósiles como el petróleo y el carbón mineral. El GN se extrae típicamente a través de la perforación y puede encontrarse en depósitos subterráneos o atrapado dentro de formaciones rocosas [41]. En la figura 2 se presenta el ciclo de utilización del GN, donde se puede observar que, para este combustible, la infraestructura, desde su extracción u obtención hasta su uso final, está muy definida.

**Figura 2**  
*Ciclo de utilización del GN*



\* Es común que los equipos que usan GN como combustible liberen metano a la atmósfera como consecuencia de ineficiencias en el proceso de combustión.

El GN es un combustible versátil que puede ser utilizado para una variedad de propósitos, incluida la calefacción de hogares y empresas, la generación de electricidad, el suministro de combustible a vehículos y la alimentación de procesos industriales. Se considera un combustible relativamente «limpio», en comparación con otros combustibles fósiles, porque produce menos  $\text{CO}_2$  y otros contaminantes cuando se quema. Sin embargo, su extracción, transporte y almacenamiento también pueden tener impactos ambientales, dado que se pueden presentar problemas de fugas y el  $\text{CH}_4$  tiene un potencial de efecto de invernadero veinticinco veces mayor al  $\text{CO}_2$  [12].

La operación de los motores de encendido por compresión en modo dual diésel-gas natural es ampliamente usada, puesto que esta estrategia de reducción de emisiones contaminantes mitiga la liberación de especies como el  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}_2$  y MP, en comparación con aquellas de la operación en modo diésel [42], [43]. Los MEC en modo dual pueden acarrear aún problemas de emisiones de gases contaminantes, pues aún no se logran reducciones prometedoras en cuanto a los hidrocarburos sin quemar y, en algunos casos, al CO y al  $\text{CO}_2$ . Para esto, una de las estrategias que tiene mayor tendencia es el uso conjunto de biodiésel y gas natural, por cuanto son una medida que puede mitigar el efecto propio de la relación diésel y gas natural [44].

### 2.3 Hidrógeno

El hidrógeno es el elemento químico más ligero y abundante en el universo; y se encuentra en la atmósfera terrestre en pequeñas cantidades y en forma molecular ( $\text{H}_2$ ). Además, es un gas inodoro, incoloro e insípido a temperatura y presión ambiente, y es altamente inflamable. El hidrógeno tiene muchos usos, incluidos los combustibles para cohetes, en la producción de amoníaco para fertilizantes, y en la refinación de metales [45]. También está siendo cada vez más explorado como una posible fuente de energía limpia, ya que puede ser utilizado en celdas de combustible para generar electricidad sin producir emisiones de gases de efecto invernadero.

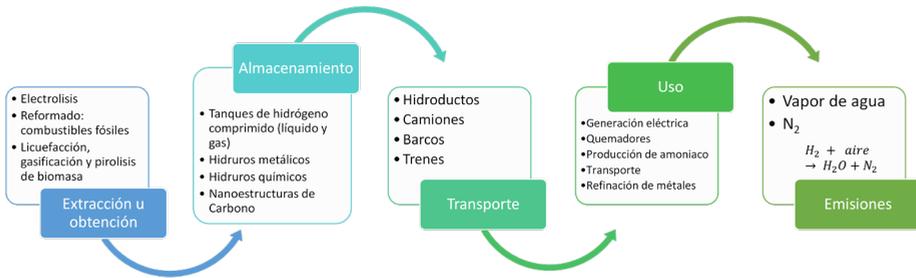
Cuando se utiliza como combustible en una celda de combustible, el  $\text{H}_2$  reacciona con el oxígeno para producir agua y electricidad. Aunque el  $\text{H}_2$  en sí es un combustible limpio, la mayor parte del  $\text{H}_2$  producido hoy en día se deriva de combustibles fósiles como el GN, el cual produce  $\text{CO}_2$  y otros gases de efecto invernadero durante el proceso de extracción y producción [46]. Sin embargo, el  $\text{H}_2$  también se puede producir a partir de fuentes renovables, como la energía eólica o solar, utilizando para ello procesos de electrólisis, lo que puede convertirlo en una fuente de energía verdaderamente sostenible y con huella de carbono «nula» [47], [48].

Por esta razón, algunos investigadores en MCI han optado por el uso de  $\text{H}_2$ , el cual puede ayudar a la disminución de gases contaminantes como el  $\text{CO}_2$ , los hidrocarburos sin quemar, y el MP, en comparación con combustibles como el diésel, el biodiésel y el GN [49]. A pesar de esto, uno de los problemas de usar  $\text{H}_2$  con GN es el incremento de los  $\text{NO}_x$ , ya que la temperatura en la cámara de combustión aumenta [50]. Adicionalmente, aparecen otros fenómenos como el golpeteo o *knocking*, la preignición o

retroceso de llama, fenómenos que representan una restricción en el uso de este combustible debido a que pueden limitar la presión máxima al interior del cilindro y reducir la eficiencia del motor, además de causar daños mecánicos a los elementos físicos del motor [41]. Otro obstáculo para el uso del hidrógeno es la dificultad de almacenarlo y transportarlo de forma económica [51], [52].

Como se observa en la figura 3, el hidrógeno puede almacenarse como gas comprimido, como líquido y como sólido; el factor común en cada uno de ellos es un alto consumo energético que genera una relación costo/beneficio negativa.

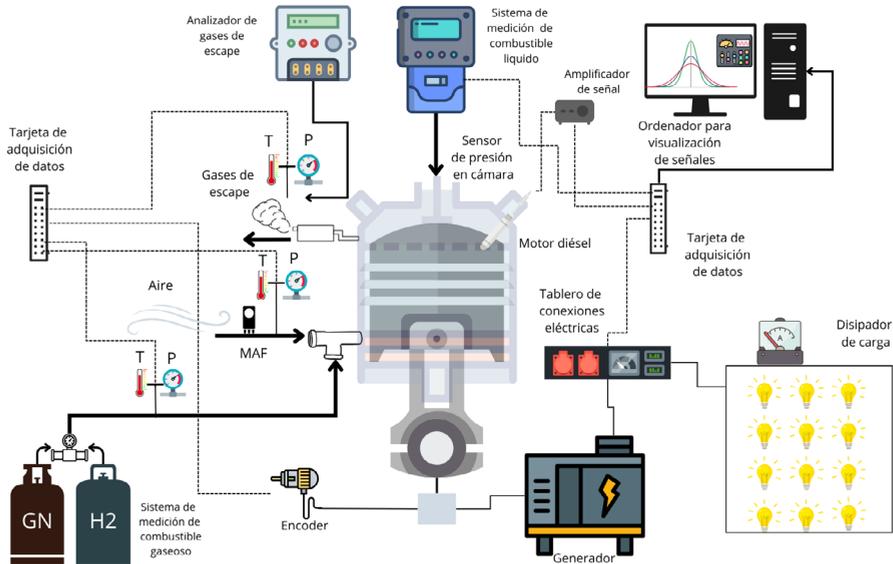
**Figura 3**  
*Ciclo de utilización del  $H_2$*



### 3. Configuración del montaje experimental y proceso de medición de variables

El procedimiento presentado a continuación, se basa en las mediciones realizadas en un grupo electrógeno con motor Yanmar monocilíndrico de aspiración natural, refrigerado por aire con una potencia nominal de 3,5 kW a 3600 rpm, ver figura 4.

**Figura 4**  
*Montaje experimental, principales componentes y sistemas de medición de parámetros efectivos*



El grupo electrógeno se modificó, a fin de medir tanto la presión de admisión del aire como la de los gases de combustión; también, se midieron las temperaturas del aire de admisión, la de los gases de combustión y la del aceite de lubricación; así mismo, se realizó la medición del flujo de combustible piloto, mediante un medidor de flujo másico Coriolis, de marca Siemens, modelo SITRANS 2100DI; igualmente, se usaron dos medidores de flujo volumétricos de marca Omega, modelo FMA5400/5500, para el GN y, modelo FMA1700/1800, para el H<sub>2</sub>; y se utilizó un analizador de gases SICK, modelo GMS810, el cual cuenta con un sensor infrarrojo no

dispersivo, para determinar las concentraciones de  $\text{CO}_2$ , el  $\text{CH}_4$  y el  $\text{CO}$  en los gases de combustión; por otro lado, se usó un sensor paramagnético marca MAIHAK, modelo GM810, para la medición del oxígeno ( $\text{O}_2$ ).

Para la disipación de la carga generada por el grupo electrógeno, la cual se determinó a través de un amperímetro y un voltímetro para la medición de corriente y voltaje, respectivamente, se usó un sistema eléctrico conformado por un banco de bombillos. En la tabla 1 se presentan algunos datos técnicos de los equipos utilizados durante las pruebas.

**Tabla 1.** Características técnicas de los equipos de medición

---

Consumo biodiésel	<b>Marca:</b> Sensor Coriolis - Siemens, SITRANS 2100DI <b>Rango:</b> 12,5 – 250 kg/h <b>Resolución:</b> 0,1
Consumo GN y $\text{H}_2$	<b>Marca:</b> Omega - FMA1700/1800 <b>Gas medido:</b> $\text{H}_2$ <b>Rango:</b> 0-50 l/min <b>Resolución:</b> 0,001  <b>Marca:</b> Omega - FMA5400/5500 <b>Gas medido:</b> Gas natural <b>Precisión:</b> +/-1,5 <b>Resolución:</b> 0 - 100 SLM
Emissiones gaseosas	<b>Marca:</b> SICK GMS 810 <b>Gases analizados:</b> % $\text{CO}_2$ , % $\text{CH}_4$ , % $\text{CO}$ <b>Rango:</b> 0 -2000 ppm <b>Resolución:</b> +/- 1 ppm  <b>Marca:</b> $\text{O}_2$ - MAIHAK GM810 <b>Gases analizados:</b> % $\text{O}_2$ <b>Resolución:</b> 0-25%Vol.

---

Las mediciones se llevaron a cabo en tres niveles de carga del motor, correspondientes al 25%, 62% y 100%, utilizando biodiésel como combustible piloto, GN,  $\text{H}_2$ , y GN enriquecido con  $\text{H}_2$ , como combustibles sustitutos, tal como se indica en la tabla 2. Cada prueba se realizó dos veces para confirmar la repetitividad de los resultados.

**Tabla 2.** *Número de pruebas realizadas en el desarrollo experimental*

Combustible	Grado de carga		
	Primero	Segundo	Tercero
	25%	62%	100%
<b>Biodiésel</b>	2	2	2
<b>Biodiésel + GN</b>	2	2	2
<b>Biodiésel + H<sub>2</sub></b>	2	2	2
<b>Biodiésel + GN + H<sub>2</sub></b>	2	2	2

Las pruebas se realizaron después de una fase de precalentamiento del motor, durante 5 minutos, operando con biodiésel. Posteriormente, la carga del motor se simuló al energizar la cantidad de bombillos correspondientes a la potencia de prueba en el disipador de carga, ver figura 4. Luego de esto, se empezó a adicionar el combustible gaseoso hasta alcanzar el límite máximo de operación estable y seguro del motor, el cual era determinado por la temperatura máxima del lubricante, 95 °C; la temperatura máxima de los gases en el escape, 550 °C; y la estabilidad del régimen de giro del motor, 3600 ±30 rpm. Seguidamente, se aseguraba un tiempo de estabilización de 10 minutos y, de esta forma, se iniciaba la medición de las variables descritas anteriormente.

Cabe mencionar que todas las pruebas se llevaron a cabo durante un tiempo de muestreo de 10 minutos y con una resolución de un dato por segundo. Para finalizar, los datos recolectados en el montaje experimental fueron procesados y almacenados por medio de una plataforma de monitoreo y control implementada en el software LabVIEW™, los cuales fueron utilizados en los cálculos y análisis de resultados. En particular, en la tabla 3 se presentan los valores medidos para las diferentes variables de operación en los grados de carga. Los valores medidos en el primer grado de carga fueron los datos utilizados para ilustrar el procedimiento de cálculo llevado a cabo y mostrado más adelante.

**Tabla 3.** Valores de operación medidos en los grados de carga de operación del motor

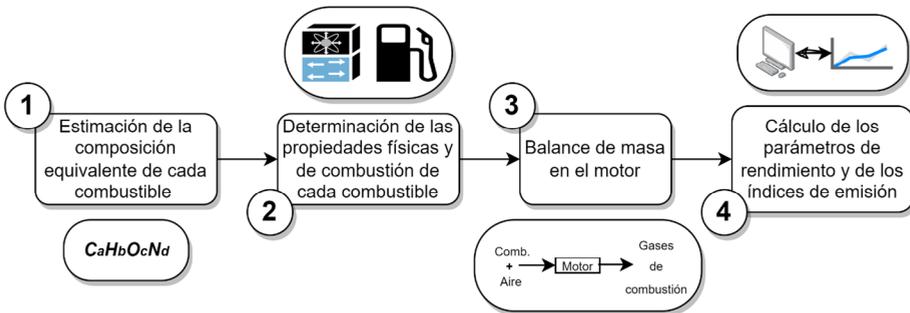
<b>Primer grado de carga</b>					
	<b>Biodiésel</b>	<b>Biodiésel + GN</b>	<b>Biodiésel + H<sub>2</sub></b>	<b>Biodiésel + GN + H<sub>2</sub></b>	
Potencia eléctrica (W)	518,01	496,48	496,48	503,10	
Consumo biodiésel (g/s)	143,93×10 <sup>-3</sup>	67,28×10 <sup>-3</sup>	136,50×10 <sup>-3</sup>	85,42×10 <sup>-3</sup>	
Consumo GN (L/min)	-	8,61	-	5,88	
Consumo H <sub>2</sub> (L/min)	-	-	6,67	4,27	
Emisiones gaseosas	%CO <sub>2</sub>	4,75	3,65	3,70	
	%CO	10,91×10 <sup>-2</sup>	6,81×10 <sup>-2</sup>	6,75×10 <sup>-2</sup>	
	%O <sub>2</sub>	14,40	14,00	14,70	14,10
	%NO	10,41×10 <sup>-3</sup>	10,92×10 <sup>-3</sup>	11,58×10 <sup>-3</sup>	9,83×10 <sup>-3</sup>
	%CH <sub>4</sub>	-	0,90	-	0,55
	%H <sub>2</sub>	0,25	0,50	0,75	0,75
<b>Segundo grado de carga</b>					
	<b>Biodiésel</b>	<b>Biodiésel + GN</b>	<b>Biodiésel + H<sub>2</sub></b>	<b>Biodiésel + GN + H<sub>2</sub></b>	
Potencia eléctrica (W)	1261,13	1246,56	1252,44	1246,560	
Consumo biodiésel (g/s)	208,37×10 <sup>-3</sup>	89,84×10 <sup>-3</sup>	178,73×10 <sup>-3</sup>	95,44×10 <sup>-3</sup>	
Consumo GN (L/min)	-	9,33	-	6,60	
Consumo H <sub>2</sub> (L/min)	-	-	6,67	4,24	
Emisiones gaseosas	%CO <sub>2</sub>	6,40	5,70	5,75	5,10
	%CO	7,841×10 <sup>-2</sup>	5,96×10 <sup>-2</sup>	5,68×10 <sup>-2</sup>	22,30×10 <sup>-2</sup>
	%O <sub>2</sub>	10,80	11,60	11,70	11,80
	%NO	20,26×10 <sup>-3</sup>	23,77×10 <sup>-3</sup>	23,01×10 <sup>-3</sup>	21,87×10 <sup>-3</sup>
	%CH <sub>4</sub>	-	0,70	-	0,45
	%H <sub>2</sub>	0,15	0,45	0,45	0,60

<b>Tercer grado de carga</b>					
	<b>Biodiésel</b>	<b>Biodiésel + GN</b>	<b>Biodiésel + H<sub>2</sub></b>	<b>Biodiésel + GN + H<sub>2</sub></b>	
Potencia eléctrica (W)	1937,20	1964,60	1983,40	1943,70	
Consumo biodiésel (g/s)	$284,80 \times 10^{-3}$	$123,05 \times 10^{-3}$	$294,20 \times 10^{-3}$	$125,43 \times 10^{-3}$	
Consumo GN (L/min)	-	10,76	-	7,32	
Consumo H <sub>2</sub> (L/min)	-	-	6,67	4,27	
Emisiones gaseosas	%CO <sub>2</sub>	8,65	8,24	8,15	7,55
	%CO	$14,74 \times 10^{-2}$	$13,24 \times 10^{-2}$	$12,19 \times 10^{-2}$	$23,32 \times 10^{-2}$
	%O <sub>2</sub>	7,05	9,05	9,55	9,00
	%NO	$33,08 \times 10^{-3}$	$37,69 \times 10^{-3}$	$36,58 \times 10^{-3}$	$40,63 \times 10^{-3}$
	%CH <sub>4</sub>	-	0,50	-	0,35
	%H <sub>2</sub>	0,10	0,45	0,30	0,30

## 4. Descripción de la metodología de cálculo

La ruta de cálculo llevada a cabo parte de la determinación de la composición equivalente, o fórmula química, de los combustibles utilizados y de la estimación de las principales propiedades físicas y de combustión de estos, lo cual se complementa con los datos de consumo de combustible y de potencia eléctrica generada. Con esto se plantea un balance de masa en el motor, permitiendo estimar el consumo específico de combustible piloto y los porcentajes de sustitución, en términos másicos y energéticos, del combustible piloto por el GN y el H<sub>2</sub>. Seguidamente, se obtiene la eficiencia térmica del grupo electrógeno y, por último, con base en las emisiones de CO<sub>2</sub>, CO y O<sub>2</sub>, medidas en los gases de escape, se estiman los índices de emisión obtenidos por el grupo electrógeno en el punto de operación analizado. En la figura 5 se muestra un resumen del procedimiento de cálculo llevado a cabo.

**Figura 5**  
*Ruta de cálculo llevada a cabo en la determinación de parámetros de rendimiento y emisiones específicas del grupo electrógeno*



\* Los literales a, b, c y d de la fórmula corresponden al número de átomos de cada elemento en la molécula equivalente.

### 4.1 Composición equivalente

Para lograr determinar la composición equivalente de los combustibles, lo primero que se debe tener en cuenta es la fase del combustible, debido a que si este se encuentra en fase líquida, lo más común es que se conozca su composición elemental, la cual está en función del porcentaje másico

de cada elemento en el combustible (%mas<sub>i</sub>) —Carbono (C), Hidrógeno (H), Oxígeno (O), Nitrógeno (N) y Azufre (S)—; y si este se encuentra en fase gaseosa, la composición que se conoce muy probablemente se presente en base volumétrica o fracción molar de cada gas componente en el combustible. A continuación, se presenta un modelo para cada uno de los combustibles de interés.

#### 4.1.1 Biodiésel

Lo primero que se debe hacer es conocer la composición elemental del biodiésel, en este caso, la composición elemental; según Yakoob *et al.* [53], es 76,95% C, 10,91% O y 12,14% H; por tanto, la fracción másica de cada elemento (i), considerando 1 kg de biodiésel (bio), sería:

$$y_i = \frac{\%mas_i}{100} \quad (1)$$

$$y_C = 0,770 \frac{kg_C}{kg_{bio}}$$

$$y_H = 0,121 \frac{kg_H}{kg_{bio}}$$

$$y_O = 0,109 \frac{kg_O}{kg_{bio}}$$

Luego, se procede a determinar el número de moles de cada uno de los elementos por kilogramo de combustible (N<sub>i</sub>); para ello, la fracción másica (y<sub>i</sub>) se divide por la masa atómica del elemento (M<sub>i</sub>), así:

$$N_i \frac{kmol_i}{kg_{bio}} = \frac{y_i \frac{kg_i}{kg_{bio}}}{M_i \frac{kg_i}{kmol_i}} \quad (2)$$

$$N_C = \frac{0,770 \frac{kg_C}{kg_{bio}}}{12 \frac{kg_C}{kmol_C}} = 0,064 \frac{kmol_C}{kg_{bio}}$$

$$N_H = \frac{0,121 \frac{kg_H}{kg_{bio}}}{1 \frac{kg_H}{kmol_H}} = 0,121 \frac{kmol_H}{kg_{bio}}$$

$$N_O = \frac{0,109 \frac{kg_O}{kg_{bio}}}{16 \frac{kg_O}{kmol_O}} = 6,819 \times 10^{-3} \frac{kmol_O}{kg_{bio}}$$

Al dividir el número de moles por kilogramo de combustible ( $N_i$ ) de cada uno de los elementos por el número de moles de carbono ( $N_C$ ) se obtiene la relación de moles de cada elemento en relación con las moles de carbono ( $N_i^*$ ).

$$N_i^* \frac{kmol_i}{kmol_C} = \frac{N_i \frac{kmol_i}{kg_{bio}}}{N_C \frac{kmol_C}{kg_{bio}}} \quad (3)$$

$$N_C^* = \frac{0,064 \frac{kmol_C}{kg_{bio}}}{0,064 \frac{kmol_C}{kg_{bio}}} = 1 \frac{kmol_C}{kmol_C}$$

$$N_H^* = \frac{0,121 \frac{kmol_H}{kg_{bio}}}{0,064 \frac{kmol_C}{kg_{bio}}} = 1,893 \frac{kmol_H}{kmol_C}$$

$$N_O^* = \frac{6,819 \times 10^{-3} \frac{kmol_O}{kg_{bio}}}{0,064 \frac{kmol_C}{kg_{bio}}} = 0,106 \frac{kmol_O}{kmol_C}$$

Multiplicando por la masa molecular de cada elemento ( $M_i$ ), se obtiene la masa de cada elemento por kmol de carbono ( $M_i^*$ ), y una masa molecular equivalente ( $M_{eq}^*$ ) que servirá para realizar unos cálculos más adelante:

$$M_i^* \frac{kg_i}{kmol_C} = N_i^* \frac{kmol_i}{kmol_C} \times M_i \frac{kg_i}{kmol_i} \quad (4)$$

$$M_C^* = 1 \frac{kmol_C}{kmol_C} \times 12 \frac{kg_C}{kmol_C} = 12 \frac{kg_C}{kmol_C}$$

$$\begin{aligned}
 M_{\text{O}}^* &= 0,106 \frac{\text{kmol}_{\text{O}}}{\text{kmol}_{\text{C}}} \times \frac{16 \text{kg}_{\text{O}}}{\text{kmol}_{\text{O}}} = 1,696 \frac{\text{kg}_{\text{O}}}{\text{kmol}_{\text{C}}} \\
 M_{\text{H}}^* &= 1,893 \frac{\text{kmol}_{\text{H}}}{\text{kmol}_{\text{C}}} \times 1 \frac{\text{kg}_{\text{H}}}{\text{kmol}_{\text{H}}} = 1,893 \frac{\text{kg}_{\text{H}}}{\text{kmol}_{\text{C}}} \\
 M_{\text{eq}}^* \frac{\text{kg}_{\text{bio}}}{\text{kmol}_{\text{C}}} &= \sum M_i^* \frac{\text{kg}_i}{\text{kmol}_{\text{C}}} \\
 M_{\text{eq}}^* &= 15,595 \frac{\text{kg}_{\text{bio}}}{\text{kmol}_{\text{C}}}
 \end{aligned} \tag{5}$$

En el caso del biodiésel se tiene que la masa molecular ( $M_{\text{bio}}$ ) es igual a  $293,2 \text{ kg}_{\text{bio}}/\text{kmol}_{\text{bio}}$  [53]. Se mide de manera experimental o se puede estimar a partir de otras propiedades físicas del combustible, tal como se muestra más adelante.

La relación molar ( $r_i$ ) de cada elemento en el combustible se calcula tal como sigue:

$$\begin{aligned}
 r_i \frac{\text{kmol}_i}{\text{kmol}_{\text{bio}}} &= \frac{N_i^* \frac{\text{kmol}_i}{\text{kmol}_{\text{C}}} \times M_{\text{bio}} \frac{\text{kg}_{\text{bio}}}{\text{kmol}_{\text{bio}}}}{M_{\text{eq}}^* \frac{\text{kg}_{\text{bio}}}{\text{kmol}_{\text{C}}}} \\
 r_{\text{C}} &= \frac{1 \frac{\text{kmol}_{\text{C}}}{\text{kmol}_{\text{C}}} \times 293,2 \frac{\text{kg}_{\text{bio}}}{\text{kmol}_{\text{bio}}}}{15,595 \frac{\text{kg}_{\text{bio}}}{\text{kmol}_{\text{C}}}} = 18,801 \frac{\text{kmol}_{\text{C}}}{\text{kmol}_{\text{bio}}} \\
 r_{\text{H}} &= \frac{1,893 \frac{\text{kmol}_{\text{H}}}{\text{kmol}_{\text{C}}} \times 293,2 \frac{\text{kg}_{\text{bio}}}{\text{kmol}_{\text{bio}}}}{15,595 \frac{\text{kg}_{\text{bio}}}{\text{kmol}_{\text{C}}}} = 35,594 \frac{\text{kmol}_{\text{H}}}{\text{kmol}_{\text{bio}}} \\
 r_{\text{O}} &= \frac{0,106 \frac{\text{kmol}_{\text{O}}}{\text{kmol}_{\text{C}}} \times 293,2 \frac{\text{kg}_{\text{bio}}}{\text{kmol}_{\text{bio}}}}{15,595 \frac{\text{kg}_{\text{bio}}}{\text{kmol}_{\text{C}}}} = 1,999 \frac{\text{kmol}_{\text{O}}}{\text{kmol}_{\text{bio}}}
 \end{aligned} \tag{6}$$

Posteriormente, se organiza y se obtiene la composición equivalente del biodiésel:

$$\begin{aligned}
 \text{C}_{r_{\text{C}}} \text{H}_{r_{\text{H}}} \text{N}_{r_{\text{N}}} \text{O}_{r_{\text{O}}} \text{S}_{r_{\text{S}}} \\
 \text{C}_{18,801} \text{H}_{35,594} \text{O}_{1,999}
 \end{aligned} \tag{7}$$

## 4.1.2 Gas natural

Como se comentó anteriormente, a diferencia de los combustibles líquidos, la composición de los combustibles gaseosos suele estar dada en base volumétrica (%Vol) o en fracción molar de cada uno de los gases que componen la mezcla combustible. En el caso del GN, la composición reportada por la Transportadora de Gas Internacional [54] es de 83,029% CH<sub>4</sub>, 10,205% C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, 3,260% C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>, 1,881% CO<sub>2</sub>; y 1,625% de otros gases (C<sub>4</sub>+), en (%vol.). Dado que no se sabe concretamente a qué gases se está haciendo referencia con C<sub>4</sub>+, se debe repartir este porcentaje de manera proporcional a los demás gases; por ende, la fracción volumétrica (v<sub>i</sub>) de cada componente, considerando 1 m<sup>3</sup> de GN, sería:

$$v_i \frac{m_i^3}{m_{GN}^3} = \left( \frac{\%Vol_i}{\%CH_4 + \%C_2H_6 + \%C_3H_8 + \%CO_2} \right) \quad (8)$$

$$v_{CH_4} = \left( \frac{83,029}{83,029 + 10,205 + 3,260 + 1,881} \right) = 0,844 \frac{m_{CH_4}^3}{m_{GN}^3}$$

$$v_{C_2H_6} = \left( \frac{10,205}{83,029 + 10,205 + 3,260 + 1,881} \right) = 0,104 \frac{m_{C_2H_6}^3}{m_{GN}^3}$$

$$v_{C_3H_8} = \left( \frac{3,260}{83,029 + 10,205 + 3,260 + 1,881} \right) = 0,033 \frac{m_{C_3H_8}^3}{m_{GN}^3}$$

$$v_{CO_2} = \left( \frac{1,881}{83,029 + 10,205 + 3,260 + 1,881} \right) = 0,019 \frac{m_{CO_2}^3}{m_{GN}^3}$$

Dado lo anterior, 1 m<sup>3</sup> de GN está compuesto por:

$$0,844 m_{CH_4}^3 + 0,104 m_{C_2H_6}^3 + 0,033 m_{C_3H_8}^3 + 0,019 m_{CO_2}^3$$

Según la ley de volúmenes aditivos de Amagat, la fracción volumétrica (v<sub>i</sub>) y la fracción molar (x<sub>i</sub>) de un gas en una mezcla son iguales; de ahí que la expresión anterior se puede reescribir de la siguiente manera:

$$0,844 kmol_{CH_4} + 0,104 kmol_{C_2H_6} + 0,033 kmol_{C_3H_8} + 0,019 kmol_{CO_2} = 1 kmol_{GN}$$

Haciendo uso de esta equivalencia, se procede a determinar la relación molar (r<sub>i</sub>) de cada elemento en el combustible; esto, se realiza al sumar el

producto de la fracción molar de cada gas ( $x_i$ ) y el número de átomos que lo componen. El procedimiento se ilustra a continuación:

$$r_C \frac{\text{kmol}_C}{\text{kmol}_{GN}} = \sum x_i \frac{\text{kmol}_i}{\text{kmol}_{GN}} \times n \frac{\text{kmol}_C}{\text{kmol}_i} \quad (9)$$

$$r_H \frac{\text{kmol}_H}{\text{kmol}_{GN}} = \sum x_i \frac{\text{kmol}_i}{\text{kmol}_{GN}} \times m \frac{\text{kmol}_H}{\text{kmol}_i} \quad (10)$$

$$r_O \frac{\text{kmol}_O}{\text{kmol}_{GN}} = \sum x_i \frac{\text{kmol}_i}{\text{kmol}_{GN}} \times q \frac{\text{kmol}_O}{\text{kmol}_i} \quad (11)$$

$$r_N \frac{\text{kmol}_N}{\text{kmol}_{GN}} = \sum x_i \frac{\text{kmol}_i}{\text{kmol}_{GN}} \times p \frac{\text{kmol}_N}{\text{kmol}_i} \quad (12)$$

$$r_S \frac{\text{kmol}_S}{\text{kmol}_{GN}} = \sum x_i \frac{\text{kmol}_i}{\text{kmol}_{GN}} \times r \frac{\text{kmol}_S}{\text{kmol}_i} \quad (13)$$

$$r_C = \left( 0,844 \frac{\text{kmol}_{CH_4}}{\text{kmol}_{GN}} \times 1 \frac{\text{kmol}_C}{\text{kmol}_{CH_4}} \right) + \left( 0,104 \frac{\text{kmol}_{C_2H_6}}{\text{kmol}_{GN}} \times 2 \frac{\text{kmol}_C}{\text{kmol}_{C_2H_6}} \right) + \left( 0,033 \frac{\text{kmol}_{C_3H_8}}{\text{kmol}_{GN}} \times 3 \frac{\text{kmol}_C}{\text{kmol}_{C_3H_8}} \right) + \left( 0,019 \frac{\text{kmol}_{CO_2}}{\text{kmol}_{GN}} \times 1 \frac{\text{kmol}_C}{\text{kmol}_{CO_2}} \right) = 1,17 \frac{\text{kmol}_C}{\text{kmol}_{GN}}$$

$$r_H = \left( 0,844 \frac{\text{kmol}_{CH_4}}{\text{kmol}_{GN}} \times 4 \frac{\text{kmol}_H}{\text{kmol}_{CH_4}} \right) + \left( 0,104 \frac{\text{kmol}_{C_2H_6}}{\text{kmol}_{GN}} \times 6 \frac{\text{kmol}_H}{\text{kmol}_{C_2H_6}} \right) + \left( 0,033 \frac{\text{kmol}_{C_3H_8}}{\text{kmol}_{GN}} \times 8 \frac{\text{kmol}_H}{\text{kmol}_{C_3H_8}} \right) = 4,264 \frac{\text{kmol}_H}{\text{kmol}_{GN}}$$

$$r_O = \left( 0,019 \frac{\text{kmol}_{CO_2}}{\text{kmol}_{GN}} \times 2 \frac{\text{kmol}_O}{\text{kmol}_{CO_2}} \right) = 0,038 \frac{\text{kmol}_O}{\text{kmol}_{GN}}$$

Enseguida, se organiza y se obtiene la composición equivalente del gas natural:

$$C_{r_C} H_{r_H} N_{r_N} O_{r_O} S_{r_S} \quad (14)$$

$$C_{1,170} H_{4,264} O_{0,038}$$

### 4.1.3 Hidrógeno

En el caso del  $H_2$ , la composición equivalente se da de manera directa, ya que se supone que el hidrógeno usado tiene una pureza del 100%. En el caso en que esta pureza sea diferente, la composición equivalente se determina de manera análoga a la del GN.

## 4.2 Propiedades físicas y de combustión de los combustibles de interés

### 4.2.1 Masa molecular

La masa molecular es la suma de las masas atómicas de todos los átomos que componen una molécula; se expresa en kilogramos por cada kilomol de sustancia; es una propiedad característica de cada sustancia y se utiliza para determinar la cantidad de sustancia presente en una muestra.

#### 4.2.1.1 Biodiésel

La masa molecular del biodiésel ( $M_{av,bio}$ ) se toma directamente de la literatura o se puede calcular usando el procedimiento reportado por He & Pryor [55]. La masa molecular promedio del biodiésel ( $M_{av,bio} = M_{bio}$ ), se estima en función de la masa molecular promedio de los ácidos grasos que lo componen ( $M_{av,FA}$ ):

$$M_{av,bio} \frac{kg}{kmol} = M_{av,FA} \frac{kg}{kmol} + 14 \frac{kg}{kmol} \quad (15)$$

La masa molecular promedio de los ácidos grasos ( $M_{av,FA}$ ) se estima a partir de la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{M_{av,FA}} = \sum \frac{y_{i,FA}}{M_{i,FA}} \quad (16)$$

Donde:

$y_i$  [-], fracción másica de cada ácido graso

$M_{i,FA} \left[ \frac{kg_i}{kmol_i} \right]$ , Masa molecular de cada ácido graso

Con el ánimo de ilustrar el procedimiento y verificar el valor reportado por He & Pryor, se toman los porcentajes de ácidos grasos del biodiésel reportados por Yakoob *et al.* [53], los cuales se observan en la tabla 4; los mismos, se deben normalizar, debido a que la suma de las fracciones másicas no da 100%.

**Tabla 4.** Porcentajes de ácidos grasos normalizados

	<b>Palmítico (C16:0)</b>	<b>Estearico (C18:0)</b>	<b>Oleico (C18:1)</b>	<b>Linoleico (C18:2)</b>	<b>Linolénico (C18:3)</b>
Porcentaje	9,0%	3,3%	22,6%	58,8%	6,3%
$M_{i,FA} \left[ \frac{kg}{kmol} \right]$	256,5	284,5	282,5	280,5	278,5

Se procede a determinar la masa molecular de los ácidos grasos, de acuerdo con la ecuación 16, así:

$$\frac{1}{M_{av,FA}} = \frac{9,0\%}{256,5} + \frac{3,3\%}{284,5} + \frac{22,6\%}{282,5} + \frac{58,8\%}{280,5} + \frac{6,3\%}{278,5} \rightarrow \frac{0,09}{256,5} + \frac{0,033}{284,5} + \frac{0,226}{282,5} + \frac{0,588}{280,5} + \frac{0,063}{278,5}$$

$$\frac{1}{M_{av,FA}} = \frac{1}{3,589 \times 10^{-3}} \frac{kmol}{kg}$$

$$M_{av,FA} = 278,59 \frac{kg}{kmol}$$

Se despeja el resultado anterior en la ecuación 15, para obtener la masa molecular del biodiésel.

$$M_{av,bio} = 278,59 \frac{kg}{kmol} + 14 \frac{kg}{kmol}$$

$$M_{av,bio} = 292,59 \frac{kg}{kmol}$$

El valor de la masa molecular obtenido es consistente con el hallado por Yakoob *et al.* [53], siendo este de 293,2 kg /kmol.

#### 4.2.1.2 Gas natural

Ya que el GN es un combustible gaseoso, la estimación de la masa molecular sigue un procedimiento diferente. La masa molecular de una mezcla de gases es igual a la sumatoria del producto de la relación molar de cada elemento en el combustible, multiplicado por la masa molecular del elemento:

$$M_{GN} \frac{kg_{GN}}{kmol_{GN}} = \sum r_i \frac{kmol_i}{kmol_{GN}} \times M_i \frac{kg_i}{kmol_i} \quad (17)$$

$$M_{GN} = \left( 1,17 \frac{kmol_C}{kmol_{GN}} \times 12 \frac{kg_C}{kmol_C} \right) + \left( 4,264 \frac{kmol_H}{kmol_{GN}} \times 1 \frac{kg_H}{kmol_H} \right) + \left( 0,038 \frac{kmol_O}{kmol_{GN}} \times 16 \frac{kg_O}{kmol_O} \right) \\ = 18,912 \frac{kg_{GN}}{kmol_{GN}}$$

### 4.2.1.3 Hidrógeno

Para el hidrógeno se sigue el mismo procedimiento usado para el GN:

$$M_{H_2} = \left( 2 \frac{kmol_H}{kmol_{H_2}} \times 1 \frac{kg_H}{kmol_H} \right) = 2 \frac{kg_H}{kmol_{H_2}}$$

### 4.2.2 Densidad

La densidad ( $\rho_i$ ) de una sustancia es una propiedad física que representa la cantidad de masa contenida en un determinado volumen. Se calcula dividiendo la masa de la sustancia entre su volumen. Es una medida de la «compactación» de la sustancia, es decir, cuánta materia está presente en un espacio determinado.

#### 4.2.2.1 Biodiésel

La densidad de los combustibles líquidos se determina de manera experimental usando un densímetro. En el caso de los biodiésel, esta prueba está regulada por la norma ASTM D6751-02 [56]; el método para medir la densidad del biodiésel se describe en la sección 4.2.2 de dicha norma y se utiliza un densímetro con una escala graduada en grados de densidad específica ( $g/cm^3$ ) a una temperatura de referencia de 15 °C. El trabajo presentado por Yakoob *et al.* [53] reporta una densidad de 887  $kg/m^3$  para el biodiésel.

#### 4.2.2.2 Gas natural

La densidad de los combustibles gaseosos se estima aplicando la ley de los gases ideales para las condiciones de presión y temperatura a las que están sometidos; en este caso, los combustibles son suministrados directamente en el múltiple de admisión del motor, en el cual se midió una presión absoluta promedio ( $p_{adm}$ ) de 84,053 kPa y una temperatura promedio ( $T_{adm}$ ) de 29,523 °C. El procedimiento de cálculo de la densidad del GN se presenta a continuación. La constante de gas ideal ( $R_u$ ) tiene un valor de 8,314  $kJ/kmol \cdot K$ .

$$\rho_i \frac{kg}{m^3} = \frac{P_{adm} \frac{kg}{m \times s^2} \times M_i \frac{kg}{kmol}}{R_u \frac{m^2 \times s^2}{kmol \times K} \times T_{adm} K} \quad (18)$$

$$\rho_{GN} = \frac{84053 \frac{kg}{m \times s^2} \times 18,912 \frac{kg}{kmol}}{\frac{kg}{8314,47 \frac{m^2 \times s^2}{kmol \times K}} \times 302,673 K} = 0,632 \frac{kg}{m^3}$$

### 4.2.2.3 Hidrógeno

Para el H<sub>2</sub> se tiene:

$$\rho_{H_2} = \frac{84053 \frac{kg}{m \times s^2} \times 2 \frac{kg}{kmol}}{\frac{kg}{8314,47 \frac{m^2 \times s^2}{kmol \times K}} \times 302,673 K} = 0,067 \frac{kg}{m^3}$$

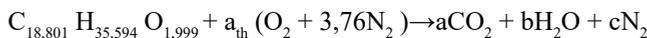
## 4.2.3 Relación aire/combustible estequiométrico

La relación aire/combustible ( $\frac{A}{F}$ )<sub>th</sub> estequiométrica (th) da cuenta de la cantidad de masa de aire (m<sub>a,th</sub>) necesaria para oxidar completamente el combustible (m<sub>i</sub>). Para los motores es de suma importancia, en vista de que da cuenta de la cantidad de aire desplazado en el cilindro, al usar diferentes tipos de combustibles:

$$\left(\frac{A}{F}\right)_{th,i} = \frac{m_{a,th} \text{ kg}_{aire}}{m_i \text{ kg}_i} = \frac{N_{a,th} \text{ kmol}_{aire} \times M_a \frac{\text{kg}_{aire}}{\text{kmol}_{aire}}}{N_i \text{ kmol}_i \times M_i \frac{\text{kg}_i}{\text{kmol}_i}} \quad (19)$$

### 4.2.3.1 Biodiésel

Partiendo del balance para la reacción de combustión completa entre el biodiésel y el aire, se obtiene la ( $\frac{A}{F}$ )<sub>th</sub> deseada. El procedimiento se ilustra a continuación:



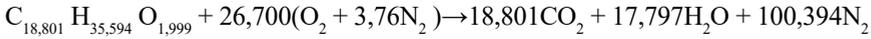
$$C: 18,801 = a \rightarrow a = 18,801$$

$$H: 35,594 = 2 \times b \rightarrow b = 17,797$$

$$O: 1,999 + 2 \times a_{th} = 2 \times a + b \rightarrow a_{th} = 26,700$$

$$N : a_{th} \times 3,76 \times 2 = 2 \times c \rightarrow c = 100,394$$

La reacción de combustión balanceada es:

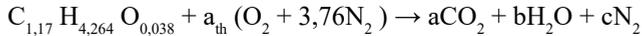


Solucionando la ecuación 19, la  $\left(\frac{A}{F}\right)_{th}$  para el biodiésel es, entonces:

$$\left(\frac{A}{F}\right)_{th} = \frac{127,097 \text{ kmol}_{aire} \times 28,97 \frac{\text{kg}_{aire}}{\text{kmol}_{aire}}}{1 \text{ kmol}_{bio} \times 293,2 \frac{\text{kg}_{bio}}{\text{kmol}_{bio}}} = 12,558 \frac{\text{kg}_{aire}}{\text{kg}_{bio}}$$

### 4.2.3.2 Gas natural

Para el GN se aplica el mismo procedimiento que para el biodiésel:



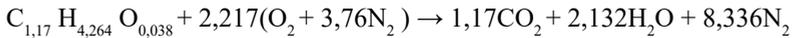
$$C: 1,17 = a \rightarrow a = 1,17$$

$$H: 4,264 = 2 \times b \rightarrow b = 2,132$$

$$O: 0,038 + 2 \times a_{th} = 2 \times a + b \rightarrow a_{th} = 2,217$$

$$N: a_{th} \times 3,76 \times 2 = 2 \times c \rightarrow c = 8,336$$

La reacción de combustión balanceada es:



La  $\left(\frac{A}{F}\right)_{th}$  para el GN es, entonces:

$$\left(\frac{A}{F}\right)_{th} = \frac{10,553 \text{ kmol}_{aire} \times 28,97 \frac{\text{kg}_{aire}}{\text{kmol}_{aire}}}{1 \text{ kmol}_{GN} \times 18,912 \frac{\text{kg}_{GN}}{\text{kmol}_{GN}}} = 16,165 \frac{\text{kg}_{aire}}{\text{kg}_{GN}}$$

### 4.2.3.3 Hidrógeno

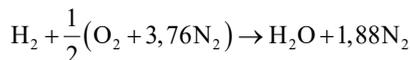


$$H: 2 = 2 \times b \rightarrow b = 1$$

$$O: 2 \times a_{th} = b \rightarrow a_{th} = 1/2$$

$$N: a_{th} \times 3,76 \times 2 = 2 \times c \rightarrow c = 1,88$$

La reacción de combustión balanceada es:



La  $\left(\frac{A}{F}\right)_{th}$  para el  $H_2$  es:

$$\left(\frac{A}{F}\right)_{th} = \frac{2,38 \text{ kmol}_{aire} \times 28,97 \frac{\text{kg}_{aire}}{\text{kmol}_{aire}}}{1 \text{ kmol}_{H_2} \times 2 \frac{\text{kg}_{GN}}{\text{kmol}_{H_2}}} = 34,474 \frac{\text{kg}_{aire}}{\text{kg}_{H_2}}$$

Si se compara el valor de  $\left(\frac{A}{F}\right)_{th}$  para cada uno de los combustibles utilizados, notamos que el  $H_2$  demanda mayor cantidad de aire por unidad de combustible; Sin embargo, el  $H_2$  es a su vez, el combustible con menor densidad, lo que se traduce en un mayor desplazamiento de aire cuando se usa en una máquina térmica de aspiración natural, esto tendría como consecuencia una reducción significativa de la eficiencia volumétrica.

#### 4.2.4 Porcentaje de $CO_2$ máximo

El porcentaje de  $CO_2$  máximo ( $\%CO_{2,max}$ ) relaciona la cantidad de moles de  $CO_2$ , generados en la reacción de combustión estequiométrica, con la cantidad de humos secos —suma de  $CO_2$  y  $N_2$  en los gases de combustión— y sirve para estimar el máximo porcentaje de esta molécula, que puede ser medido en los gases de escape del motor, al usar un combustible en particular. De acuerdo con la reacción de combustión balanceada, el  $\%CO_{2,max}$  se estima como sigue:

$$\%CO_{2,max} = \frac{N_{CO_2}}{N_{CO_2} + N_{N_2}} \times 100 \quad (20)$$

##### 4.2.4.1 Biodiésel

Para el biodiésel se tiene:

$$\%CO_{2,max} = \frac{18,801}{18,801 + 100,394} \times 100 = 15,80 \%$$

##### 4.2.4.2 Gas natural

Para el GN se tiene:

$$\%CO_{2,max} = \frac{1,17}{1,17 + 8,336} \times 100 = 12,30 \%$$

### 4.2.4.3 Hidrógeno

El  $H_2$ , al no contar con átomos de carbono en su composición, no produce  $CO_2$ . En algunos casos, durante la medición se encuentra  $CO_2$  en los gases de combustión, cuando se utilizan motores que utilizan  $H_2$  como combustible; lo anterior, se debe a la oxidación del aceite lubricante y, por esta misma razón, es posible medir niveles de  $CO_2$  mayores a los máximos teóricos en motores que usan otros tipos de combustibles.

### 4.2.5 Poder calorífico

El poder calorífico de un combustible es la medida de su concentración energética, o sea, da cuenta de la energía que un combustible tiene por unidad de masa o de volumen. Existen dos poderes caloríficos a saber: el poder calorífico superior (PCS) y el poder calorífico inferior (PCI). En el PCS se supone que toda la energía química del combustible se transforma en energía térmica, mientras que en el PCI se toman en cuenta las «pérdidas» de energía relacionadas con la generación y evaporación del agua, a partir del hidrógeno que hace parte del combustible y de su humedad.

#### 4.2.5.1 Biodiésel

El PCS del biodiésel se determina de manera experimental por medio de una bomba calorimétrica, siguiendo un procedimiento estandarizado dado por la norma ASTM D240 [57]; sin embargo, existen algunos procedimientos alternativos para calcularlo, en función de algunas otras propiedades [58]. El poder calorífico superior del biodiésel ( $PCS_{bio}$ ) es de  $39260 \text{ kJ/kg}$  [53]. Ahora, el poder calorífico inferior del biodiésel ( $PCI_{bio}$ ) es la resta de su PCS y de la energía necesaria para mantener el agua generada en fase vapor, tal como se muestra a continuación. La entalpía de vaporización del agua ( $h_{fg}$ ) se supone igual a  $2240 \text{ kJ/kg}$ .

$$C_{18,801} H_{35,594} O_{1,999} + 26,700(O_2 + 3.76N_2) \rightarrow 18,801CO_2 + 17,797H_2O + 100,394N_2$$

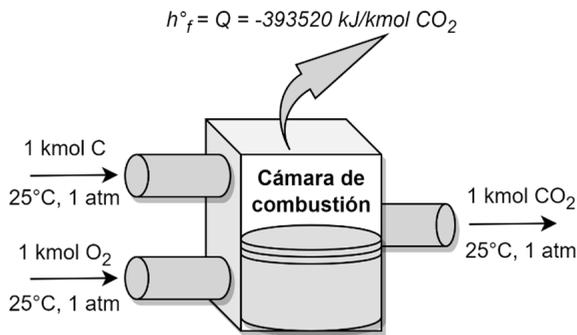
$$PCI_{bio} \frac{kJ}{kg_{bio}} = PCS_{bio} \frac{kJ}{kg_{bio}} - \frac{N_{H_2O,P} \text{ kmol}_{H_2O} \times M_{H_2O} \frac{kg_{H_2O}}{\text{kmol}_{H_2O}} \times h_{fg} \frac{kJ}{kg_{H_2O}}}{m_{bio} \text{ kg}_{bio}} \quad (21)$$

$$PCI = 39260 \frac{kJ}{kg_{bio}} - \frac{17,797 \text{ kmol}_{H_2O} \times 18 \frac{kg_{H_2O}}{\text{kmol}_{H_2O}} \times 2240 \frac{kJ}{kg_{H_2O}}}{293,2 \text{ kg}_{bio}} = 36812,576 \frac{kJ}{kg_{bio}}$$

### 4.2.5.2 Gas natural

Para estimar el PCS de un combustible gaseoso, se realiza un balance de energía en una cámara de combustión idealizada en la que ingresan los reactivos en condiciones estándar (25°C y 1 atm), y los productos salen de ella en las mismas condiciones de presión y de temperatura de los reactivos. En estas condiciones, se supone que toda la energía química del combustible ha sido transformada en energía térmica que sale de la cámara de combustión, tal como se ilustra en la figura 6.

**Figura 6**  
*Balance de energía en una cámara de combustión*

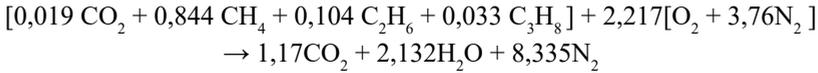


**Nota:** Adaptada de Çengel & Boles [59]

$$\text{PCS}_{\text{GN}} \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = \frac{-Q \text{ kJ}}{m_{\text{GN}} \text{ kg}} = \frac{-Q \text{ kJ}}{N_i \text{ kmol}_{\text{GN}} \times M_{\text{GN}} \frac{\text{kg}_{\text{GN}}}{\text{kmol}_{\text{GN}}}} \quad (22)$$

El calor de reacción ( $-Q$ ), que es la cantidad de energía liberada por el combustible al oxidarse completamente, depende de la entalpía de formación ( $\hat{h}_f^{\circ}$ ) de los gases presentes, tanto en la mezcla reactiva (R) como en la de los productos (P) de la combustión. El calor de reacción se estima a partir de la reacción de combustión balanceada y de un balance de energía en el modelo idealizado de la cámara de combustión.

Para las sustancias que más comúnmente se encuentran en sistemas de combustión, la entalpía de formación se puede encontrar en algunos libros de texto [59]. La entalpía del C, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> y el H<sub>2</sub> es igual a cero en las condiciones de presión y temperatura estándar, 25°C y 1 atm:



$$-Q \text{ kJ} = \sum N_{i,R} \text{ kmol}_{i,R} \times \hat{h}_{i,R}^{\circ} \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}_{i,R}} - \sum N_{i,P} \text{ kmol}_{i,P} \times \hat{h}_{i,P}^{\circ} \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}_{i,P}} \quad (23)$$

$$-Q = [0,019 \text{ kmol}_{\text{CO}_2} \times -393520 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}_{\text{CO}_2}} + 0,844 \text{ kmol}_{\text{CH}_4} \times -74850 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}_{\text{CH}_4}} + 0,104 \text{ kmol}_{\text{C}_2\text{H}_6} \\ \times -84680 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}_{\text{C}_2\text{H}_6}} + 0,033 \text{ kmol}_{\text{C}_3\text{H}_8} \times -103850 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}_{\text{C}_3\text{H}_8}}] \\ - \left[ 1,17 \text{ kmol}_{\text{CO}_2} \times -393520 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}_{\text{CO}_2}} + 2,132 \text{ kmol}_{\text{H}_2\text{O}} \times -285830 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}_{\text{H}_2\text{O}}} \right] = 986923,91 \text{ kJ}$$

Solucionando la ecuación 22, el PCS es:

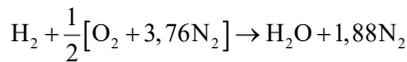
$$\text{PCS}_{\text{GN}} = \frac{986923,91 \text{ kJ}}{18,912 \text{ kg}_{\text{GN}}} = 52185,063 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_{\text{GN}}}$$

El PCI del GN se estima con base en la ecuación 21.

$$\text{PCI}_{\text{GN}} = 52185,062 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_{\text{GN}}} - \frac{2,132 \text{ kmol}_{\text{H}_2\text{O}} \times 18 \frac{\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}}{\text{kmol}_{\text{H}_2\text{O}}} \times 2240 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}}}{18,912 \text{ kg}_{\text{GN}}} = 47639,682 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_{\text{GN}}}$$

### 4.2.5.3 Hidrógeno

Similar a lo presentado para el GN, el PCS y PCI del H<sub>2</sub> se estima a partir de la reacción de combustión balanceada y usando las ecuaciones 21 a 23:



$$-Q = [0 \text{ kJ}] - \left[ 1 \text{ kmol}_{\text{H}_2\text{O}} \times -285830 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}_{\text{H}_2\text{O}}} \right] = 285830 \text{ kJ}$$

$$\text{PCS}_{\text{H}_2} = \frac{285830 \text{ kJ}}{2,016 \text{ kg}_{\text{H}_2}} = 141780,754 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_{\text{H}_2}}$$

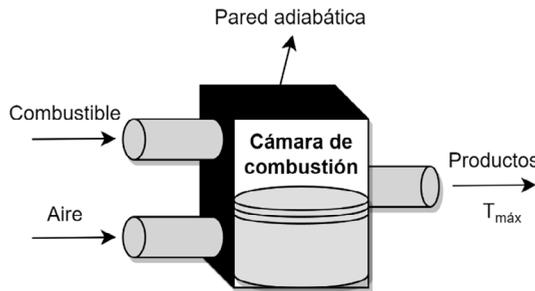
$$\text{PCI}_{\text{H}_2} = 141780,754 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_{\text{H}_2}} - \frac{1 \text{ kmol}_{\text{H}_2\text{O}} \times 18 \frac{\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}}{\text{kmol}_{\text{H}_2\text{O}}} \times 2240 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}}}{2,016 \text{ kg}_{\text{H}_2}} = 121780,754 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_{\text{H}_2}}$$

## 4.2.6 Temperatura de llama adiabática

Es la temperatura que alcanzan los productos de combustión cuando la reacción se lleva a cabo en condiciones adiabáticas, ver figura 7; bajo estas condiciones, se asume que toda la energía liberada por la reacción de combustión ( $-Q$ ) es usada para incrementar la temperatura de los gases de combustión. La temperatura de llama adiabática ( $T_{ad}$ ) depende del tipo de combustible, del dosado relativo de la mezcla reactiva y de las condiciones de temperatura y presión de esta. La temperatura de llama adiabática es de interés, ya que tiene una relación directa con la producción de gases contaminantes, como los  $\text{NO}_x$  e, inversa, con el CO y los HC.

Para calcular la temperatura de llama adiabática, se parte de un balance de energía en una cámara de combustión, ver figura 7 y ecuación 24:

**Figura 7**  
*Balance de energía en una cámara de combustión adiabática*



**Nota:** adaptada de Çengel & Boles [59]

$$\sum N_{i,P} kmol_{i,P} \times \Delta \hat{h}_{si,P} \frac{kJ}{kmol_{i,P}} = -Q \text{ kJ} + \sum N_{i,R} kmol_{i,R} \times \Delta \hat{h}_{si,R} \frac{kJ}{kmol_{i,R}} \quad (24)$$

El calor de reacción se estima de manera similar al calculado para el PCS; la diferencia radica en que en las condiciones de temperatura que se espera, salgan los productos, el agua estará en fase vapor y no en fase líquida; de ahí que se debe hacer esa corrección. Una vez que se especifican los reactivos y sus estados, resulta fácil determinar la variación en la entalpía de los reactivos ( $\Delta \hat{h}_{s,R}$ ); sin embargo, en razón a que la temperatura de los productos no se conoce antes de los cálculos, el cálculo de la variación en la entalpía de los productos ( $\Delta \hat{h}_{s,P}$ ) no es directo; por consiguiente, la

determinación de la temperatura de llama adiabática requiere el uso de una técnica iterativa.

La variación en la entalpía sensible de los reactivos y de los productos se estima a partir de la ecuación 25, usando los valores de entalpía reportados en [59].

$$\Delta \hat{h}_{si} \frac{kJ}{kg} = \hat{h}_{si@T} \frac{kJ}{kg} - \hat{h}_{si@298K} \frac{kJ}{kg} \quad (25)$$

El número de moles de los reactivos ( $N_{i,R}$ ) y de los productos ( $N_{i,P}$ ) se obtiene a partir del balance de la reacción de combustión para cada uno de los combustibles usados.

#### 4.2.6.1 Biodiésel

Para el biodiésel se puede usar el mismo procedimiento anterior, solo que el calor de reacción para este combustible se puede estimar en función del PCI, así:

$$\begin{aligned} -Q \text{ kJ} &= m_{bio} \text{ kg}_{bio} \times \text{PCI}_{bio} \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_{bio}} \quad (26) \\ -Q &= 293,2 \text{ kg}_{bio} \times 36812,576 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_{bio}} = 10793447,28 \text{ kJ} \end{aligned}$$

Suponiendo que los reactivos entran a la cámara de combustión en condiciones estándar, la variación en la entalpía sensible de ellos sería igual a cero:

$$\sum N_{i,R} \text{ kmol}_{i,R} \times \Delta \hat{h}_{si,R} \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}_{i,R}} = 0 \text{ kJ}$$

A partir del balance de la reacción de combustión y teniendo en consideración los dos resultados anteriores, las ecuaciones 24 y 25 se resuelven de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} C_{18,801} H_{35,594} O_{1,999} + 26,700 (O_2 + 3,76N_2) &\rightarrow 18,801 CO_2 + 17,797 H_2O + 100,394 N_2 \\ 18,801 \text{ kmol}_{CO_2} \times (\hat{h}_{CO_2@T} - 9364) \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}_{CO_2}} &+ 17,797 \text{ kmol}_{H_2O} \times (\hat{h}_{H_2O@T} - 9904) \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}_{H_2O}} \\ + 100,394 \text{ kmol}_{N_2} \times (\hat{h}_{N_2@T} - 8669) \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}_{N_2}} &= 10793447,28 \text{ kJ} + 0 \text{ kJ} \\ 18,801 \hat{h}_{CO_2@T} \text{ kJ} + 17,797 \hat{h}_{H_2O@T} \text{ kJ} + 100,394 \hat{h}_{N_2@T} \text{ kJ} &= 12016076,92 \text{ kJ} \quad (27) \end{aligned}$$

Dividiendo el lado derecho de la ecuación 27 por el número total de moles de los productos, tenemos:

$$\frac{12016076,92 \text{ kJ}}{18,801 \text{ kmol}_{\text{CO}_2} + 17,797 \text{ kmol}_{\text{H}_2\text{O}} + 100,394 \text{ kmol}_{\text{N}_2}} = 87713,712 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}_p}$$

Este valor se puede suponer igual a la entalpía sensible del nitrógeno. La temperatura a la cual corresponde, constituye una primera aproximación a la temperatura de llama adiabática:

$$T_1 = 2628,93 \text{ K}$$

Con esta misma temperatura se halla la entalpía sensible para el  $\text{CO}_2$  y el vapor de agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ). Reemplazando en la ecuación 27, se tiene:

$$13485362,34 \text{ kJ} > 12016076,92 \text{ kJ}$$

Como no se cumple la igualdad, se asume que la temperatura de llama adiabática debe ser menor; se supone, entonces, otra temperatura:

$$T_2 = 2350 \text{ K}$$

Con esta temperatura se halla la entalpía sensible para el  $\text{CO}_2$ , el  $\text{H}_2\text{O}$  y  $\text{N}_2$ , y reemplazando de nuevo en la ecuación 27, se obtiene:

$$11870879,04 \text{ kJ} < 12016076,92 \text{ kJ}$$

Significa, por consiguiente, que la temperatura de llama adiabática real se encuentra entre  $T_1$  y  $T_2$ . Interpolando, se obtiene:

$$T_{\text{adbio}} = 2375,08 \text{ K}$$

#### 4.2.6.2 Gas natural

Para el GN en condiciones estequiométricas, aplicando las ecuaciones 24 y 25, y siguiendo el mismo procedimiento presentado para el biodiésel, se obtiene lo siguiente:

$$[0,844 \text{ CH}_4 + 0,104 \text{ C}_2\text{H}_6 + 0,033 \text{ C}_3\text{H}_8 + 0,019 \text{ CO}_2] + 2,217[\text{O}_2 + 3,76\text{N}_2] \rightarrow$$

$$1,17\text{CO}_2 + 2,132\text{H}_2\text{O} + 8,335\text{N}_2$$

$$-Q = [0,019 \text{ kmol}_{\text{CO}_2} \times -393520 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}_{\text{CO}_2}} + 0,844 \text{ kmol}_{\text{CH}_4} \times -74850 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}_{\text{CH}_4}} + 0,104 \text{ kmol}_{\text{C}_2\text{H}_6}$$

$$\times -84680 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}_{\text{C}_2\text{H}_6}} + 0,033 \text{ kmol}_{\text{C}_3\text{H}_8} \times -103850 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}_{\text{C}_3\text{H}_8}}]$$

$$-\left[ 1,17 \text{ kmol}_{\text{CO}_2} \times -393520 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}_{\text{CO}_2}} + 2,132 \text{ kmol}_{\text{H}_2\text{O}} \times -241820 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}_{\text{H}_2\text{O}}} \right] = 893094,59 \text{ kJ}$$

Suponiendo que los reactivos entran a la cámara de combustión en condiciones estándar, la entalpía sensible de ellos sería igual a cero:

$$\sum N_{i,R} \text{ kmol}_{i,R} \times \Delta \hat{h}_{s,i,R} \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}_{i,R}} = 0 \text{ kJ}$$

La entalpía sensible de los productos es diferente de cero y se estima como se muestra a continuación:

$$\begin{aligned} & 1,17 \text{ kmol}_{\text{CO}_2} \times (\hat{h}_{\text{CO}_2@T} - 9364) \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}_{\text{CO}_2}} + 2,132 \text{ kmol}_{\text{H}_2\text{O}} \times (\hat{h}_{\text{H}_2\text{O}@T} - 9904) \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}_{\text{H}_2\text{O}}} \\ & + 8,335 \text{ kmol}_{\text{N}_2} \times (\hat{h}_{\text{N}_2@T} - 8669) \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}_{\text{N}_2}} = 893094,59 \text{ kJ} + 0 \text{ kJ} \\ & 1,17 \hat{h}_{\text{CO}_2@T} \text{ kJ} + 2,132 \hat{h}_{\text{H}_2\text{O}@T} \text{ kJ} + 8,335 \hat{h}_{\text{N}_2@T} \text{ kJ} = 997421,913 \text{ kJ} \end{aligned} \quad (28)$$

Dividiendo el lado derecho de la ecuación 28 por el número total de moles de los productos:

$$\frac{997421,913 \text{ kJ}}{1,17 \text{ kmol}_{\text{CO}_2} + 2,132 \text{ kmol}_{\text{H}_2\text{O}} + 8,335 \text{ kmol}_{\text{N}_2}} = 85711,258 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}_p}$$

Este valor se puede suponer igual a la entalpía sensible del nitrógeno. La temperatura a la cual corresponde, constituye una primera aproximación a la temperatura de llama adiabática:

$$T_1 = 2574,43 \text{ K}$$

Con esta misma temperatura, se halla la entalpía sensible para el  $\text{CO}_2$  y el  $\text{H}_2\text{O}$ . Reemplazando en la ecuación 28, tenemos:

$$1114169,65 \text{ kJ} > 997421,913 \text{ kJ}$$

Como no se cumple la igualdad, se supone una temperatura más baja:

$$T_2 = 2300 \text{ K}$$

Con esta temperatura se halla la entalpía sensible para el  $\text{CO}_2$ , el  $\text{H}_2\text{O}$  y el  $\text{N}_2$  y, reemplazando de nuevo en la ecuación 28, tenemos:

$$979390,678 \text{ kJ} < 997421,913 \text{ kJ}$$

Lo anterior, quiere decir que la temperatura de llama adiabática se encuentra entre y . Interpolando, se obtiene:

$$T_{adGN} = 2336,74 K$$

### 4.2.6.3 Hidrógeno

Para el  $H_2$  en condiciones estequiométricas, aplicando las ecuaciones 24 y 25 y, siguiendo el mismo procedimiento presentado para el GN, se tiene lo siguiente:

$$H_2 + \frac{1}{2}[O_2 + 3,76N_2] \rightarrow H_2O + 1,88N_2$$

$$-Q = [0 kJ] - \left[ 1 kmol_{H_2O} \times -241820 \frac{kJ}{kmol_{H_2O}} \right] = 241820 kJ$$

Suponiendo que los reactivos entran a la cámara de combustión en condiciones estándar, la entalpía sensible de ellos sería igual a cero:

$$\sum N_{i,R} kmol_{i,R} \times \hat{h}_{si,R} \frac{kJ}{kmol_{i,R}} = 0 kJ$$

La entalpía sensible de los productos es diferente de cero y se estima como se muestra a continuación:

$$1 kmol_{H_2O} \times (\hat{h}_{H_2O@T} - 9904) \frac{kJ}{kmol_{H_2O}} + 1,88 kmol_{N_2} \times (\hat{h}_{N_2@T} - 8669) \frac{kJ}{kmol_{N_2}} = 241820 kJ + 0 kJ$$

$$\hat{h}_{H_2O@T} kJ + 1,88 \hat{h}_{N_2@T} kJ = 268021,72 kJ \quad (29)$$

Dividiendo el lado derecho de la ecuación 29 por el número total de moles de los productos:

$$\frac{268021,72 kJ}{1 kmol_{H_2O} + 1,88 kmol_{N_2}} = 93063,09 \frac{kJ}{kmol_p}$$

Este valor se puede suponer igual a la entalpía sensible del nitrógeno. La temperatura a la cual corresponde esta, supone una primera aproximación a la temperatura de llama adiabática:

$$T_1 = 2774,20 K$$

Con esta misma temperatura se halla la entalpía sensible para el  $\text{CO}_2$  y el  $\text{H}_2\text{O}$ . Reemplazando en la ecuación 29, resulta:

$$298740,18 \text{ kJ} > 268021,72 \text{ kJ}$$

Como no se cumple la igualdad, se supone una temperatura más baja:

$$T_2 = 2500 \text{ K}$$

Con esta temperatura se halla la entalpía sensible para el  $\text{CO}_2$ , el  $\text{H}_2\text{O}$  y el  $\text{N}_2$ , y reemplazando en la ecuación 29, tenemos:

$$264872,28 \text{ kJ} < 268021,72 \text{ kJ}$$

Lo anterior quiere decir que la temperatura de llama adiabática se encuentra entre  $T_1$  y  $T_2$ . Interpolando, se obtiene:

$$T_{\text{adH}_2} = 2525,49 \text{ K}$$

Las propiedades físicas y de combustión calculadas para los combustibles utilizados se presentan en la tabla 5:

**Tabla 5.** *Propiedades físicas y de combustión de los combustibles utilizados*

	Biodiésel	Gas natural	Hidrógeno
Composición equivalente	$C_{18,801} H_{35,594} O_{1,999}$	$C_{1,17} H_{4,264} O_{0,038}$	$H_2$
Masa molecular ( $kg/kmol$ )	293,20	18,91	2,02
Densidad ( $kg/m^3$ )	887	0,632	0,067
$(A/F)_{th}$ ( $kg_{aire} / kg_{comb}$ )	12,56	16,17	34,45
%CO2max	15,80	12,30	-
PCS ( $kJ / kg$ )	39260	52185,06	141780,75
PCI ( $kJ / kg$ )	36812,58	47639,68	121780,75
Temperatura de llama adiabática ( $^{\circ}C$ )	2101,93	2063,59	2252,34

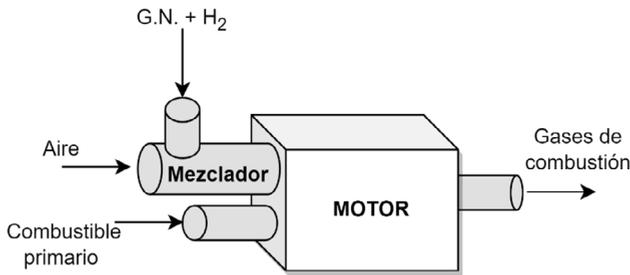
Notas:

- La densidad del biodiésel se obtiene de [53].
- La densidad del GN y del  $\text{H}_2$  fueron calculadas para una presión y temperatura de 84,053 kPa y 29,523  $^{\circ}C$ , respectivamente.

### 4.3 Balance de masa

Un balance de masa se basa en la aplicación práctica de la *ley de conservación de la materia*. En la figura 8 se muestra un esquema del modelo propuesto para el balance de masa de la reacción de combustión en el motor; en este caso, se toma el motor como una «caja negra» debido a que no se conoce exactamente que está ocurriendo dentro de este; luego se valora, en términos de masa, lo que está ingresando y lo que está saliendo, estimando así los consumos, porcentajes de sustitución e índices de emisión:

**Figura 8**  
*Balance de masa para el motor*



Se determina el flujo másico de combustible total ( $\dot{m}_{comb}$ ), el cual corresponde a la suma de las mezclas utilizadas en cada prueba, en este caso la mezcla compuesta por biodiésel, GN y  $H_2$ .

$$\dot{m}_{comb} \frac{kg_{comb}}{s} = \dot{m}_{bio} \frac{kg_{bio}}{s} + \dot{m}_{GN} \frac{kg_{GN}}{s} + \dot{m}_{H_2} \frac{kg_{H_2}}{s} \quad (30)$$

#### 4.3.1 Estimación de flujos másicos

##### 4.3.1.1 Biodiésel

$$\dot{m}_{bio} = 85,160 \frac{mg}{s} \times \frac{1 kg}{1000000 mg} = 8,542 \times 10^{-5} \frac{kg_{bio}}{s}$$

##### 4.3.1.2 Gas natural

Dado que en la metodología utilizada en la experimentación se midieron los flujos volumétricos ( $\dot{V}_i$ ) de los combustibles gaseosos, se debe realizar la corrección por densidad ( $\rho_i$ ) para obtener los flujos másicos:

$$\dot{m}_i \frac{kg}{s} = \dot{V}_i \frac{m^3}{s} \times \rho_i \frac{kg}{m^3} \quad (31)$$

Para el GN se tiene:

$$\dot{V}_{GN} = 5,88 \frac{L}{min} \times \frac{1 min}{60 seg} \times \frac{0,001 m^3}{1 L} = 9,8 \times 10^{-5} \frac{m^3}{s}$$

$$\dot{m}_{GN} = 9,8 \times 10^{-5} \frac{m^3}{s} \times 0,6316 \frac{kg}{m^3} = 6,194 \times 10^{-5} \frac{kg_{GN}}{s}$$

### 4.3.1.3 Hidrógeno

Aplicando el mismo procedimiento al H<sub>2</sub>, se obtiene:

$$\dot{V}_{H_2} = 4,27 \frac{L}{min} \times \frac{1 min}{60 seg} \times \frac{0,001 m^3}{1 L} = 7,117 \times 10^{-5} \frac{m^3}{s}$$

$$\dot{m}_{H_2} = 7,117 \times 10^{-5} \frac{m^3}{s} \times 0,0673 \frac{kg}{m^3} = 4,798 \times 10^{-6} \frac{kg_{H_2}}{s}$$

La masa total de combustible ingresado al motor es:

$$\dot{m}_{comb} = 8,542 \times 10^{-5} \frac{kg_{bio}}{s} + 6,194 \times 10^{-5} \frac{kg_{GN}}{s} + 4,798 \times 10^{-6} \frac{kg_{H_2}}{s}$$

$$\dot{m}_{comb} = 1,522 \times 10^{-4} \frac{kg_{fuel}}{s}$$

## 4.3.2 Propiedades de combustión para la mezcla combustible utilizada

Con el ánimo de estimar las principales propiedades de combustión de la mezcla combustible utilizada se hace necesario realizar un balance de la reacción de combustión estequiométrica, y aplicar procedimientos análogos a los presentados en las secciones 4.1 y 4.2.

### 4.3.2.1 Fracción másica

La fracción másica ( $y_i$ ) es la relación entre la masa de una sustancia y la masa de la mezcla total de combustibles, en este caso la mezcla compuesta por biodiésel, GN y H<sub>2</sub>. La fracción másica para cada uno de los combustibles se calcula de la siguiente manera:

$$y_i = \frac{\dot{m}_i \frac{kg_i}{s}}{\dot{m}_{comb} \frac{kg_{comb}}{s}} \quad (37)$$

$$y_{\text{bio}} = \frac{\dot{m}_{\text{bio}}}{\dot{m}_{\text{comb}}} = \frac{8,5416 \times 10^{-5} \frac{\text{kg}_{\text{bio}}}{\text{s}}}{1,522 \times 10^{-4} \frac{\text{kg}_{\text{comb}}}{\text{s}}} = 0,561 \frac{\text{kg}_{\text{bio}}}{\text{kg}_{\text{comb}}}$$

$$y_{\text{GN}} = \frac{\dot{m}_{\text{GN}}}{\dot{m}_{\text{comb}}} = \frac{6,193 \times 10^{-5} \frac{\text{kg}_{\text{GN}}}{\text{s}}}{1,522 \times 10^{-4} \frac{\text{kg}_{\text{comb}}}{\text{s}}} = 0,407 \frac{\text{kg}_{\text{GN}}}{\text{kg}_{\text{comb}}}$$

$$y_{\text{H}_2} = \frac{\dot{m}_{\text{H}_2}}{\dot{m}_{\text{comb}}} = \frac{4,798 \times 10^{-6} \frac{\text{kg}_{\text{H}_2}}{\text{s}}}{1,522 \times 10^{-4} \frac{\text{kg}_{\text{comb}}}{\text{s}}} = 0,032 \frac{\text{kg}_{\text{H}_2}}{\text{kg}_{\text{comb}}}$$

### 4.3.2.2 Flujo molar del combustible

Para poder realizar el balance estequiométrico de la reacción de combustión, es necesario estimar la composición molar de la mezcla de combustible admitido. El número de moles totales de combustible admitido por unidad de tiempo ( $\dot{N}_{\text{comb}}$ ) es igual a la sumatoria de moles del biodiésel, de gas natural y de hidrógeno, por unidad de tiempo ( $\dot{N}_i$ ).

$$\dot{N}_{\text{comb}} = \dot{N}_{\text{bio}} \text{ kmol}_{\text{bio}} + \dot{N}_{\text{GN}} \text{ kmol}_{\text{GN}} + \dot{N}_{\text{H}_2} \text{ kmol}_{\text{H}_2} \quad (38)$$

$$\dot{N}_i = \frac{\dot{m}_i \frac{\text{kg}_i}{\text{s}}}{M_i \frac{\text{kg}_i}{\text{kmol}}} \quad (39)$$

$$\dot{N}_{\text{bio}} = \frac{8,5416 \times 10^{-5} \frac{\text{kg}_{\text{bio}}}{\text{s}}}{293,2 \frac{\text{kg}_{\text{bio}}}{\text{kmol}_{\text{bio}}}} = 2,913 \times 10^{-7} \frac{\text{kmol}_{\text{bio}}}{\text{s}}$$

$$\dot{N}_{\text{GN}} = \frac{6,193 \times 10^{-5} \frac{\text{kg}_{\text{GN}}}{\text{s}}}{18,912 \frac{\text{kg}_{\text{GN}}}{\text{kmol}_{\text{GN}}}} = 3,275 \times 10^{-6} \frac{\text{kmol}_{\text{GN}}}{\text{s}}$$

$$\dot{N}_{\text{H}_2} = \frac{4,798 \times 10^{-6} \frac{\text{kg}_{\text{H}_2}}{\text{s}}}{2,016 \frac{\text{kg}_{\text{H}_2}}{\text{kmol}_{\text{H}_2}}} = 2,380 \times 10^{-6} \frac{\text{kmol}_{\text{H}_2}}{\text{s}}$$

$$\dot{N}_{\text{comb}} = 5,946 \times 10^{-6} \frac{\text{kmol}}{\text{s}}$$

### 4.3.2.3 Fracción molar

La fracción molar ( $x_i$ ) es la relación entre el número de moles de una componente ( $\dot{N}_i$ ) y el número de moles totales de la mezcla ( $\dot{N}_{\text{comb}}$ ).

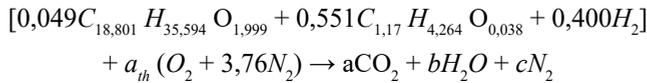
$$x_i = \frac{\dot{N}_i}{\dot{N}_{\text{comb}}} \quad (40)$$

$$x_{\text{bio}} = \frac{\dot{N}_{\text{bio}}}{\dot{N}_{\text{comb}}} = \frac{2,913 \times 10^{-7} \frac{\text{kmol}}{\text{s}}}{5,946 \times 10^{-6} \frac{\text{kmol}}{\text{s}}} \rightarrow x_{\text{bio}} = 0,049$$

$$x_{\text{GN}} = \frac{\dot{N}_{\text{GN}}}{\dot{N}_{\text{comb}}} = \frac{3,275 \times 10^{-6} \frac{\text{kmol}}{\text{s}}}{5,946 \times 10^{-6} \frac{\text{kmol}}{\text{s}}} \rightarrow x_{\text{GN}} = 0,551$$

$$x_{\text{H}_2} = \frac{\dot{N}_{\text{H}_2}}{\dot{N}_{\text{comb}}} = \frac{2,380 \times 10^{-6} \frac{\text{kmol}}{\text{s}}}{5,946 \times 10^{-6} \frac{\text{kmol}}{\text{s}}} \rightarrow x_{\text{H}_2} = 0,400$$

Se procede a hacer un balance de la reacción de combustión estequiométrica para la mezcla combustible utilizada, considerando las fracciones molares de los combustibles estimadas anteriormente:



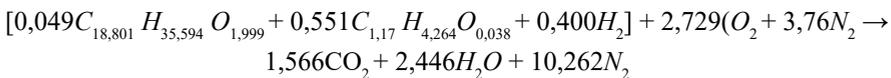
$$C: (0,049 \times 18,801) + (0,551 \times 1,17) = a \rightarrow a = 1,566$$

$$H: (0,049 \times 35,594) + (0,551 \times 4,264) + (0,400 \times 2) = 2 \times b \rightarrow b = 2,446$$

$$O: (0,049 \times 1,999) + (0,551 \times 0,038) + 2 \times a_{\text{th}} = 2 \times a + b \rightarrow a_{\text{th}} = 2,729$$

$$N: (a_{\text{th}} \times 3,76 \times 2) = 2c \rightarrow c = 10,262$$

El balance queda de la siguiente manera:



### 4.3.2.4 Masa molecular

$$M_{\text{comb}} = \sum x_i \frac{\text{kmol}_i}{\text{kmol}_{\text{comb}}} \times M_i \frac{\text{kg}_i}{\text{kmol}_i} \quad (41)$$

$$M_{\text{comb}} = 0,049 \frac{\text{kmol}_{\text{bio}}}{\text{kmol}_{\text{comb}}} \times 293,2 \frac{\text{kg}_{\text{bio}}}{\text{kmol}_{\text{bio}}} + 0,551 \frac{\text{kmol}_{\text{GN}}}{\text{kmol}_{\text{comb}}} \times 18,912 \frac{\text{kg}_{\text{GN}}}{\text{kmol}_{\text{GN}}} + 0,400 \frac{\text{kmol}_{\text{H}_2}}{\text{kmol}_{\text{comb}}} \times 2,016 \frac{\text{kg}_{\text{H}_2}}{\text{kmol}_{\text{H}_2}} = 25,588 \frac{\text{kg}_{\text{comb}}}{\text{kmol}_{\text{comb}}}$$

### 4.3.2.5 Relación aire/combustible estequiométrico

$$\left( \frac{A}{F} \right)_{\text{th}} = \frac{m_{\text{a,th}}}{m_{\text{bio}}} = \frac{N_{\text{a,th}} \times M_{\text{a}}}{N_{\text{bio}} \times M_{\text{bio}}} \quad (42)$$

$$\left( \frac{A}{F} \right)_{\text{th}} = \frac{12,990 \text{ kmol}_{\text{aire}} \times 28,97 \frac{\text{kg}_{\text{aire}}}{\text{kmol}_{\text{aire}}}}{1 \text{ kmol}_{\text{comb}} \times 25,588 \frac{\text{kg}_{\text{comb}}}{\text{kmol}_{\text{comb}}}} = 14,712 \frac{\text{kg}_{\text{aire}}}{\text{kg}_{\text{comb}}}$$

### 4.3.2.6 Porcentaje de CO<sub>2</sub> máximo

$$\%CO_{2,\text{max}} = \frac{N_{CO_2}}{N_{CO_2} + N_{N_2}} \times 100 \quad (43)$$

$$\%CO_{2,\text{max}} = \frac{1,566}{1,566 + 10,262} \times 100 = 13,2 \%$$

### 4.3.2.7 Poder calorífico

El poder calorífico inferior de la mezcla ( $PCI_{\text{comb}}$ ) se estima en función de la fracción másica ( $y_i$ ) de cada componente en la mezcla combustible y de su poder calorífico inferior ( $PCI_i$ ):

$$PCI_{\text{comb}} = \sum y_i \frac{\text{kg}_i}{\text{kg}_{\text{comb}}} \times PCI_i \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_i} \quad (44)$$

$$PCI_{\text{comb}} = \left( 0,561 \frac{\text{kg}_{\text{bio}}}{\text{kg}_{\text{comb}}} \times 36812,576 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_{\text{bio}}} \right) + \left( 0,407 \frac{\text{kg}_{\text{GN}}}{\text{kg}_{\text{comb}}} \times 47639,682 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_{\text{GN}}} \right) + \left( 0,032 \frac{\text{kg}_{\text{H}_2}}{\text{kg}_{\text{comb}}} \times 121780,754 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_{\text{GN}}} \right) = 43899,339 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_{\text{comb}}}$$

### 4.3.2.8 Temperatura de llama adiabática

Para la mezcla (biodiésel, GN y H<sub>2</sub>) se realiza el mismo procedimiento implementado para determinar la temperatura de llama adiabática en el biodiésel.

$$\sum N_{i,P} \text{ kmol}_{i,P} \times \hat{h}_{si,P} \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}_{i,P}} = -Q \text{ kJ} + \sum N_{i,R} \text{ kmol}_{i,R} \times \hat{h}_{si,R} \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}_{i,R}} \quad (45)$$

$$-Q = m_{comb} \text{ kg}_{comb} \times \text{PCI}_{comb} \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_{comb}} \quad (46)$$

$$-Q = 25,588 \text{ kg}_{comb} \times 43899,339 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_{comb}} = 1123299,078 \text{ kJ}$$

Suponiendo que los reactivos entran a la cámara de combustión en condiciones estándar (25 °C y 1 atm), la entalpía sensible de ellos sería igual a cero:

$$\sum N_{i,R} \text{ kmol}_{i,R} \times \hat{h}_{si,R} \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}_{i,R}} = 0 \text{ kJ}$$

La entalpía sensible de los reactivos y de los productos se estima a partir de la ecuación 25:

$$\hat{h}_{si} = \hat{h}_{i@T} \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - \hat{h}_{i@298\text{K}} \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (47)$$

Para la mezcla en condiciones estequiométricas, se procede de la siguiente manera:

$$0,049C_{18,801} H_{35,594} O_{1,999} + 0,551C_{1,17} H_{4,264} O_{0,038} + 0,400H_2] + 2,729(O_2 + 3,76N_2) \\ \rightarrow 1,566CO_2 + 2,446H_2O + 10,262N_2$$

$$1,566 \text{ kmol}_{CO_2} \times (\hat{h}_{CO_2@T} - 9364) \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}_{CO_2}} + 2,446 \text{ kmol}_{H_2O} \times (\hat{h}_{H_2O@T} - 9904) \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}_{H_2O}} \\ + 10,262 \text{ kmol}_{N_2} \times (\hat{h}_{N_2@T} - 8669) \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}_{N_2}} = 1123299,078 \text{ kJ}$$

$$1,566\hat{h}_{CO_2@T} \text{ kJ} + 2,446\hat{h}_{H_2O@T} \text{ kJ} + 10,262\hat{h}_{N_2@T} \text{ kJ} = 1251152,510 \quad (48)$$

Dividiendo el lado derecho de la ecuación 48 por el número total de moles de los productos, se obtiene:

$$\frac{1251152,510 \text{ kJ}}{1,566 \text{ kmol}_{CO_2} + 2,446 \text{ kmol}_{H_2O} + 10,262 \text{ kmol}_{N_2}} = 87650,630 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}}$$

Este valor se puede suponer igual a la entalpía sensible del nitrógeno. La temperatura a la cual corresponde esta entalpía supone una primera aproximación a la temperatura de llama adiabática:

$$T_1 = 2627,2 \text{ K}$$

Con esta misma temperatura se halla la entalpía sensible para el dióxido de carbono y el vapor de agua:

$$1400488,621 \text{ kJ} > 1251152,510 \text{ kJ}$$

Como no se cumple la igualdad, se supone una temperatura más baja.

$$T_2 = 2050 \text{ K}$$

$$1054482,094 \text{ kJ} < 1251152,510 \text{ kJ}$$

Lo anterior quiere decir que la temperatura de llama adiabática se encuentra entre  $T_1$  y  $T_2$ . Interpolando, se obtiene:

$$T_{ad,comb} = 2378,1 \text{ K}$$

En la tabla 6 se resumen las propiedades de combustión de las mezclas de combustible admitida:

**Tabla 6.** *Propiedades de combustión de las mezclas de combustible usadas*

Mezcla	Relación H/C	(A/F) <sub>th</sub> (kg <sub>aire</sub> /kg <sub>comb</sub> )	%CO <sub>2max</sub> (%)	PCI (kJ/kg)	Temperatura de llama adiabática (°C)
Biodiésel	1,89	12,56	15,80	36812,58	2101,93
Biodiésel + GN	2,88	14,63	13,60	43027,01	2086,08
Biodiésel + H <sub>2</sub>	2,74	13,69	14,00	41230,01	2126,12
Biodiésel + GN + H <sub>2</sub>	3,13	14,71	13,20	43899,34	2104,95

**Nota:** La determinación de estas propiedades fueron en condiciones de admisión del aire, presentadas en la sección 4.2.2 (presión de 84,053 kPa y temperatura promedio de 29,523 °C).

## 4.4 Rendimiento e índices de emisión

Los parámetros de rendimiento de un motor son medidas y características que describen su desempeño y eficiencia. Estos parámetros son importantes para evaluar y comparar el rendimiento de diferentes motores, ya sea en términos de potencia, eficiencia o impacto ambiental. Por otro lado, los índices de emisión en un motor de combustión interna son medidas que indican la cantidad de contaminantes que se emiten durante el funcionamiento del motor.

### 4.4.1 Porcentaje de sustitución másico

El porcentaje de sustitución másico ( $\%S_m$ ) da cuenta de la cantidad de masa de biodiésel que es reemplazada por la mezcla de combustible gaseosos ( $GN + H_2$ ); se determina de la siguiente manera:

$$\%S_m = \frac{\dot{m}_{\text{bio,mododiesel}} - \dot{m}_{\text{bio,mododual}}}{\dot{m}_{\text{bio,mododiesel}}} \times 100 \quad (32)$$

$$\%S_m = \frac{143,933 \times 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{s}} - 85,416 \times 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{s}}}{143,933 \times 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{s}}} \times 100 = 40,7 \%$$

### 4.4.2 Porcentaje de sustitución energético

El porcentaje de sustitución energético ( $\%S_e$ ) da cuenta de la potencia térmica ( $P$ ) del biodiésel que es reemplazada por la mezcla de combustible gaseosos:

$$\%S_e = \frac{P_{GN} + P_{H_2}}{P_{\text{bio}} + P_{GN} + P_{H_2}} \quad (33)$$

$$P_{t,i} = \dot{m}_i \frac{\text{kg}_i}{\text{s}} \times \text{PCI}_i \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_i} \quad (34)$$

$$\%S_e = \frac{(61,939 \times 10^{-6} \times 47639,682) + (4,798 \times 10^{-6} \times 121780,754)}{(61,939 \times 10^{-6} \times 47639,682) + (4,798 \times 10^{-6} \times 121780,754) + (85,416 \times 10^{-6} \times 36812,576)} \times 100$$

$$\%S_e = 52,9\%$$

### 4.4.3 Eficiencia energética

Es la relación entre la potencia eléctrica ( $P_e$ ) y la potencia térmica ( $P_t$ ) ingresada con los combustibles. En otras palabras, nos dice el porcentaje de energía química que, efectivamente, se transformó en energía eléctrica:

$$\eta_t = \frac{P_e}{P_t} = \frac{V \times I}{P_{bio} + P_{GN} + P_{H_2}} \times 100 \quad (35)$$

$$\eta_t = \frac{0,5031 \frac{\text{kJ}}{\text{s}} \times 100}{\left(85,416 \times 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 36812,57 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right) + \left(61,939 \times 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 47639,68 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right) + \left(4,798 \times 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 121780,75 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right)}$$

$$\eta_t = 7,5\%$$

### 4.4.4 Consumo específico de combustible

El consumo específico de combustible (SFC) es la cantidad de combustible que necesita un motor para entregar una unidad de energía eléctrica. El consumo específico es una forma de expresar el rendimiento del motor, en el sentido que relaciona consumo de combustible con energía entregada.

**Nota:** Es importante aclarar que el consumo específico se estima en relación al biodiésel, debido a que de esta manera se podrá analizar el efecto de usar distintas mezclas de combustibles gaseosos. Para calcular el consumo específico, se sigue el procedimiento que se muestra a continuación:

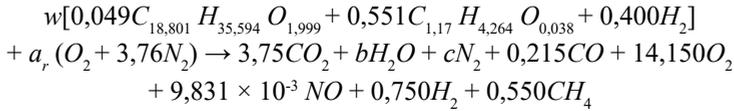
$$\text{SFC} = \frac{\dot{m}_{bio} \frac{\text{g}_{bio}}{\text{h}}}{P_e \text{ kW}_e} \quad (36)$$

$$\text{SFC} = \frac{85,416 \times 10^{-3} \frac{\text{g}_{bio}}{\text{s}} \times \frac{3600 \text{ s}}{\text{h}}}{0,5031 \text{ kW}_e} = 611,206 \frac{\text{g}_{bio}}{\text{kW}_e \cdot \text{h}}$$

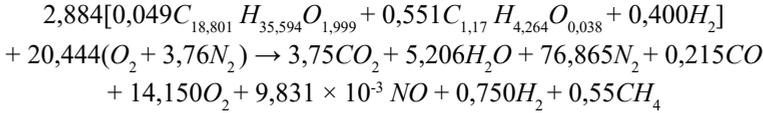
### 4.4.5 Análisis de la combustión

Con el análisis de combustión, se busca estimar los índices de emisión en cada uno de los puntos de operación del motor, de manera tal que se puedan hacer comparaciones del impacto ambiental generado por el motor utilizando cada una de las mezclas combustibles que se han estado analizando.

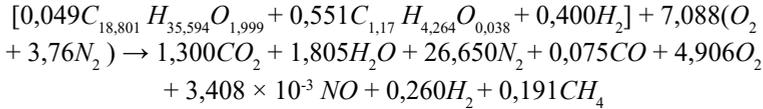
Conociendo la fracción volumétrica de cada gas emitido, se plantea un balance molecular para la reacción de combustión real:



Luego se realiza el balance y se obtienen los valores desconocidos para la reacción.



Se procede a normalizar los valores con relación a la cantidad de moles de combustible admitido ( $w$ ).



#### 4.4.5.1 Volumen de aire real

$$V_{aire_r} = a_r \times 4,76 = 33,741 \frac{m^3_{aire}}{m^3_{comb}}$$

#### 4.4.5.2 Relaciones aire/combustible real

$$\left(\frac{A}{F}\right)_r = \frac{a_r \times 4,76 \times M_{aire}}{M_{comb}} = 38,209 \frac{kg_{aire}}{kg_{comb}}$$

#### 4.4.5.3 Dosado relativo

El dosado relativo permite estimar la desviación de la reacción de combustión real en relación con la estequiométrica. Valores de dosado relativo menores a uno dan cuenta de una combustión pobre en combustible; valores de dosado relativo iguales a uno dan cuenta de una combustión estequiométrica, mientras que valores de dosado relativo superiores a uno son propios de combustiones ricas en combustible:

$$\theta = \frac{a_{th}}{a_r} = \frac{2,729}{7,088} \rightarrow \theta = 0,385$$

## 4.4.6 Índices de emisión

Los índices de emisión ( $I_i$ ) dan cuenta de la cantidad de gas emitido por cantidad de energía eléctrica generada. Según el balance para la reacción real de combustión, los índices de emisión se estiman de la siguiente manera:

$$I_i = \frac{E_i \times M_i}{x_{base} \times M_{base}} \times SFC \quad (49)$$

Donde:

$I_i \left[ \frac{g_i}{kW_e - h} \right]$ , índice de emisión de cada sustancia;

$E_i [mol_i]$ , número de moles de la especie química;

$M_i \left[ \frac{g_i}{mol_i} \right]$ , masa molecular de la emisión;

$x_{bio} [mol_{bio}]$ , fracción molar del biodiésel;

$M_{bio} \left[ \frac{g_{bio}}{mol_{bio}} \right]$ , masa molecular del biodiésel;

$SFC \left[ \frac{g_{bio}}{kW_e - h} \right]$ , consumo específico del biodiésel.

Solucionado la ecuación 49 para el  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $NO$ ,  $H_2$  y  $CH_4$  se obtiene:

$$I_{CO_2} = \frac{1,300 \text{ mol}_{CO_2}}{0,049 \text{ mol}_{bio}} \times \frac{44 \frac{g_{CO_2}}{\text{mol}_{CO_2}}}{293,2 \frac{g_{bio}}{\text{mol}_{bio}}} \times 611,206 \frac{g_{bio}}{kW_e - h} = 2434,172 \frac{g_{CO_2}}{KW_e - h}$$

$$I_{CO} = \frac{0,075 \text{ mol}_{CO}}{0,049 \text{ mol}_{bio}} \times \frac{28 \frac{g_{CO}}{\text{mol}_{CO}}}{293,2 \frac{g_{bio}}{\text{mol}_{bio}}} \times 611,206 \frac{g_{bio}}{kW_e - h} = 88,965 \frac{g_{CO}}{KW_e - h}$$

$$I_{NO} = \frac{3,408 \times 10^{-3} \text{ mol}_{NO}}{0,049 \text{ mol}_{bio}} \times \frac{30 \frac{g_{NO}}{\text{mol}_{NO}}}{293,2 \frac{g_{bio}}{\text{mol}_{bio}}} \times 611,206 \frac{g_{bio}}{kW_e - h} = 4,351 \frac{g_{NO}}{KW_e - h}$$

$$I_{CH_4} = \frac{0,191 \text{ mol}_{CH_4}}{0,049 \text{ mol}_{bio}} \times \frac{16 \frac{g_{CH_4}}{\text{mol}_{CH_4}}}{293,2 \frac{g_{bio}}{\text{mol}_{bio}}} \times 611,206 \frac{g_{bio}}{kW_e - h} = 129,822 \frac{g_{CH_4}}{KW_e - h}$$

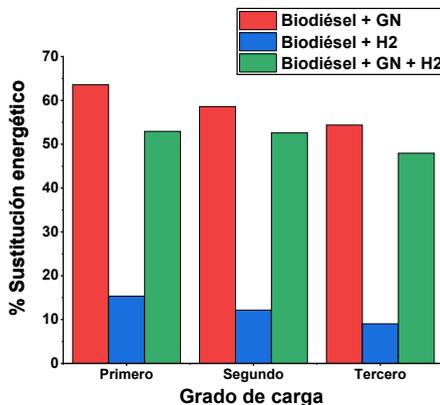
## 5. Aplicación de la metodología de cálculo al uso de biodiésel y gas natural enriquecido con hidrógeno

Como se ha puntualizado en las secciones anteriores, la finalidad del uso de mezclas GN e H<sub>2</sub> en un MEC radica en la reducción de emisiones contaminantes y en el aumento del rendimiento energético.

### 5.1 Rendimiento del motor

El porcentaje de sustitución energético da cuenta de la cantidad de biodiésel que es reemplazado por los combustibles gaseosos, ver figura 9. Se puede evidenciar que a medida que aumenta el grado de carga, disminuye el porcentaje de sustitución para todos los combustibles gaseosos utilizados, evento que ocurre, porque al aumentar el grado de carga la cantidad de energía necesaria para suplir esa demanda debe subir y, en consecuencia, el consumo de biodiésel aumenta [60], lo cual genera menos disponibilidad de aire para oxidar el combustible gaseoso [61]; por ende, la cantidad de combustible gaseoso que puede ser admitido en el motor disminuye. El porcentaje de sustitución del H<sub>2</sub> es menor que el logrado por el GN, debido a su menor densidad y mayores requerimientos de aire, remitirse a tabla 5.

**Figura 9**  
 Porcentaje de sustitución energético vs grado de carga



Mezcla	Carga	Desviación	Coefficiente de variación
Biodiésel + GN	Primero	0,41	0,64
	Segundo	0,18	0,30
	Tercero	0,10	0,18

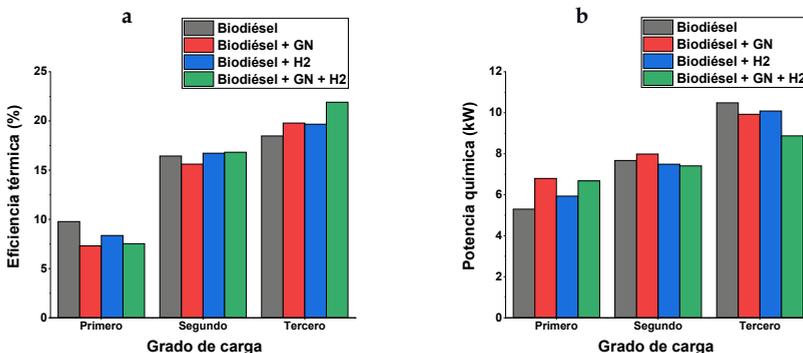
Mezcla	Carga	Desviación	Coefficiente de variación
<b>Biodiésel + H<sub>2</sub></b>	Primero	0,07	0,44
	Segundo	0,04	0,35
	Tercero	0,02	0,26
<b>Biodiésel + GN + H<sub>2</sub></b>	Primero	0,21	0,39
	Segundo	0,18	0,35
	Tercero	0,14	0,29

En la figura 10a se muestran los niveles de eficiencia térmica logrados en relación con el grado de carga. Se evidencia un aumento de la eficiencia térmica a medida que aumenta el grado de carga para todos los combustibles evaluados, lo que significa que, a mayor nivel de carga, el motor aprovecha mejor la energía que ingresa con el combustible. En el primer grado de carga, al usar biodiésel, la eficiencia térmica del motor es mayor en comparación a los demás combustibles, debido a las bajas temperaturas de la cámara de combustión.

Estos niveles de temperatura no permiten que la mezcla de combustibles gaseosos y el aire se oxide completamente cuando se opera el motor en modo dual. A medida que aumenta el grado de carga, y el motor alcanza condiciones de temperatura más altas, esta tendencia se invierte debido a una mejor combustión y un mejor aprovechamiento de la energía ingresada. La eficiencia del motor en el segundo y tercer grado de carga es mayor al usar una mezcla GN-H<sub>2</sub> que al usar GN e H<sub>2</sub> de manera independiente, lo cual se relaciona con la disminución en la potencia química ingresada, tal como se ve en la figura 10b.

**Figura 10**

*Comparativa eficiencia térmica y potencia química vs grado de carga*

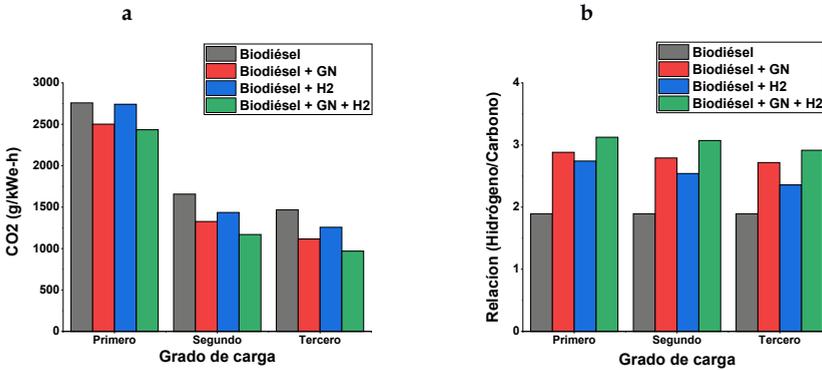


Mezcla	Carga	a		b	
		Desviación	Coefficiente de variación	Desviación	Coefficiente de variación
<b>Biodiésel</b>	Primero	0,48	4,91	0,03	0,49
	Segundo	0,27	1,64	0,03	0,34
	Tercero	0,25	1,36	0,03	0,25
<b>Biodiésel + GN</b>	Primero	0,05	0,64	0,04	0,64
	Segundo	0,05	0,30	0,02	0,30
	Tercero	0,10	0,49	0,02	0,18
<b>Biodiésel + H<sub>2</sub></b>	Primero	0,04	0,44	0,03	0,44
	Segundo	0,05	0,32	0,03	0,35
	Tercero	0,34	1,75	0,03	0,26
<b>Biodiésel + GN + H<sub>2</sub></b>	Primero	0,03	0,39	0,03	0,39
	Segundo	0,06	0,35	0,03	0,35
	Tercero	0,81	3,68	0,03	0,29

## 5.2 Emisiones

En la figura 11a se presentan las emisiones específicas de CO<sub>2</sub> para las diferentes mezclas combustibles utilizadas en función del grado de carga, en esta se puede comprobar una reducción considerable de las emisiones de CO<sub>2</sub>, conforme aumenta el grado de carga para todos los combustibles evaluados, lo que confirma lo reportado en los trabajos de Dimitriou & Tsujimura [29], Alrazen *et al.* [62] y Deb *et al.* [63]. En otras palabras, se generan menores niveles de emisiones de CO<sub>2</sub> por unidad de energía generada. En los tres grados de carga, las emisiones de CO<sub>2</sub> conservan la misma relación para todos los combustibles, siendo menores para la mezcla biodiésel-GN-H<sub>2</sub> y mayores para el biodiésel; este comportamiento es inverso al presentado en la Figura 11b, en donde se presenta la relación hidrógeno/carbono (H/C) para todas las mezclas combustibles utilizadas en los tres grados de carga. Conforme se aumenta el grado de carga, la relación H/C disminuye para todos los combustibles evaluados; esta tendencia tiene relación con lo evidenciado con el porcentaje de sustitución energético, ver figura 9. Es esta la razón por la cual las emisiones de CO<sub>2</sub> son mayores para las mezclas biodiésel-H<sub>2</sub> que para las mezclas biodiésel-GN.

**Figura 11**  
*Emisión de CO<sub>2</sub> y Relación H/C vs grado de carga*

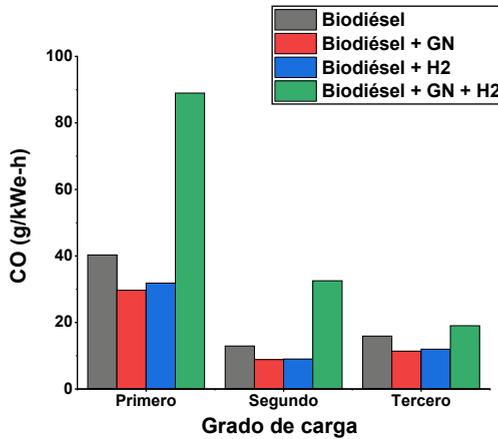


Mezcla	Carga	Desviación	a		b	
			Coefficiente de variación	Desviación	Coefficiente de variación	Desviación
<b>Biodiésel</b>	Primero	133,69	4,85	0,00	0,00	0,00
	Segundo	27,27	1,65	0,00	0,00	0,00
	Tercero	18,97	1,29	0,00	0,00	0,00
<b>Biodiésel + GN</b>	Primero	32,01	1,28	0,01	0,26	0,11
	Segundo	4,77	0,36	0,00	0,00	0,06
	Tercero	5,18	0,46	0,00	0,00	0,06
<b>Biodiésel + H<sub>2</sub></b>	Primero	12,81	0,47	0,00	0,16	0,10
	Segundo	2,55	0,18	0,00	0,00	0,06
	Tercero	21,90	1,74	0,00	0,00	0,06
<b>Biodiésel + GN + H<sub>2</sub></b>	Primero	45,87	1,88	0,01	0,19	0,17
	Segundo	45,74	3,91	0,01	0,01	0,12
	Tercero	32,36	3,34	0,00	0,00	0,12

Las emisiones de CO dan cuenta de qué tan bien se quema el combustible ingresado en la cámara de combustión. Como se observa en la figura 12, a mayor grado de carga, son menores las emisiones específicas de CO para todos los combustibles; y es que a mayor grado de carga se admite mayor cantidad de energía, generando así un aumento proporcional en la temperatura del motor que garantizan una mejor oxidación del carbono. La relación entre las emisiones de CO para todos los combustibles se mantiene en los tres grados de carga, siendo mayores para las mezclas biodiésel-GN-H<sub>2</sub> y menores para las mezclas biodiésel-GN. El uso de GN garantiza un aumento en la

relación H/C, lo que se traduce en una mejor eficiencia de combustión [64]. Así mismo, es probable que el uso de gas natural mejore la mezcla aire-combustible en el cilindro, reduciendo las zonas pobres, acelerando, de esta manera, la propagación de la llama y mejorando la combustión [11]. Aunque la adición de  $H_2$  al GN genera mayores relaciones H/C que las del GN, el desplazamiento del aire en la cámara de combustión, producto de la menor densidad del  $H_2$  [65], hacen que la eficiencia de combustión se vea reducida y, por tanto, se obtienen mayores niveles de CO por unidad de energía generada [66]. Las emisiones de CO disminuyen con el aumento del grado de carga para todas las mezclas combustible utilizadas.

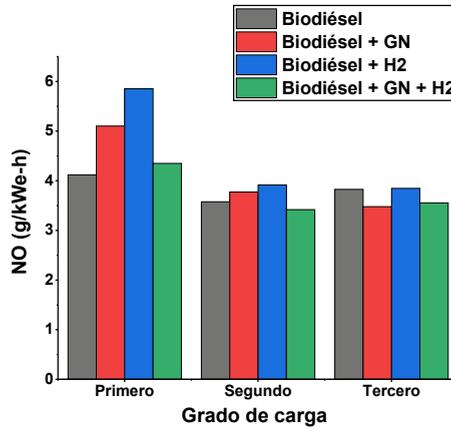
**Figura 12**  
 Emisión de CO vs grado de carga



Mezcla	Carga	Desviación	Coefficiente de variación
<b>Biodiésel</b>	Primero	3,17	7,86
	Segundo	0,13	0,97
	Tercero	0,81	5,12
<b>Biodiésel + GN</b>	Primero	2,71	9,13
	Segundo	0,00	0,04
	Tercero	0,25	2,20
<b>Biodiésel + H<sub>2</sub></b>	Primero	1,06	3,31
	Segundo	0,85	9,45
	Tercero	0,09	0,78
<b>Biodiésel + GN + H<sub>2</sub></b>	Primero	0,55	0,62
	Segundo	3,30	10,13
	Tercero	0,61	3,22

Las emisiones de monóxido de nitrógeno (NO) se muestran la Figura 13. Las emisiones de NO para todos los combustibles evaluados en función del grado de carga no presentan una variación significativa. Tampoco es posible atribuir un efecto importante a la mezcla de combustible utilizada. En sus trabajos, [67], [68], plantean que el uso de hidrógeno como combustible sustituto puede significar un aumento en los niveles de  $\text{NO}_x$  principalmente atribuido a un aumento en la temperatura de combustión. Sin embargo, tal como se comentó previamente, la adición de  $\text{H}_2$  genera un desplazamiento de aire admitido lo que trae consigo una disminución en la eficiencia de combustión.

**Figura 13**  
*Emisiones de NO vs grado de carga*



Mezcla	Carga	Desviación	Coefficiente de variación
<b>Biodiésel</b>	Primero	0,26	6,27
	Segundo	0,08	2,12
	Tercero	0,03	0,71
<b>Biodiésel + GN</b>	Primero	0,34	6,71
	Segundo	0,10	2,65
	Tercero	0,14	4,06
<b>Biodiésel + H<sub>2</sub></b>	Primero	0,01	0,10
	Segundo	0,16	4,12
	Tercero	0,04	1,08
<b>Biodiésel + GN + H<sub>2</sub></b>	Primero	0,30	6,80
	Segundo	0,28	8,09
	Tercero	0,06	1,76

## 6. Conclusiones

En este trabajo se presenta la metodología propuesta para estimar los índices de emisión y rendimiento de un grupo electrógeno diésel que opera en modo dual. Se aplica la metodología propuesta usando biodiésel como combustible piloto, y GN,  $H_2$  y mezclas GN- $H_2$  como combustibles primarios. Se describe la metodología experimental y de medición de las variables de interés; también se presenta un ejemplo de cálculo de las diferentes propiedades de combustión de los combustibles utilizados, así como los índices de emisión y de rendimiento del motor. Finalmente, se realiza un análisis de los resultados obtenidos. Las principales conclusiones se presentan a continuación:

- El uso de biodiésel como combustible piloto en un motor diésel en modo dual puede reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, disminuir la dependencia de los combustibles fósiles y promover la transición hacia fuentes de energía más sostenibles. Esto porque el biodiésel se obtiene a partir de fuentes renovables como aceites vegetales usados, lo que lo convierte en una opción más sostenible; además, el uso de GN e  $H_2$  pueden contribuir a la reducción de las emisiones de gases contaminantes y de efecto invernadero.
- El porcentaje de sustitución energético del biodiésel es menor conforme aumenta el grado de carga del motor. Se lograron porcentajes de sustitución energéticos mayores para el GN y mezclas GN- $H_2$ , que para el  $H_2$ . Se lograron porcentajes de sustitución máximos de 63,5% al usar GN como combustible sustituto.
- La eficiencia térmica del motor aumenta conforme aumenta el grado de carga. El uso de la mezcla GN- $H_2$  genera mayores niveles de eficiencia que al usar GN y  $H_2$  de manera independiente. Se obtuvieron eficiencias de hasta 21,9%.
- Las emisiones específicas de  $CO_2$  disminuyen a medida que aumenta el grado de carga para todas las mezclas de combustible evaluadas. Las emisiones son menores para mezclas biodiésel-GN- $H_2$  y mayores para el biodiésel. Se obtuvieron valores mínimos de 969 g/kWe-h.
- Las mezclas biodiésel-GN- $H_2$  generan las mayores emisiones de CO, mientras que la mezcla biodiésel-GN generan las menores. Aunque la adición de  $H_2$  aumenta la relación H/C este combustible desplaza aire en la admisión limitando la oxidación del carbono. Se obtuvieron emisiones mínimas de CO del orden de 9 g/kWe-h.

- Las emisiones de monóxido de nitrógeno no presentan una variación significativa en relación con el grado de carga y al tipo de combustible utilizado. Se obtuvieron valores máximos de 5,85 g/kWe-h con mezclas biodiésel-H<sub>2</sub>, y mínimas de 3,42 g/kWe-h al usar una mezcla de biodiésel-GN+H<sub>2</sub>.

En conclusión, la metodología propuesta es adecuada para calcular parámetros de desempeño de grupos electrógenos en modo dual y, en el caso particular de este trabajo, el uso de MEC en modo dual con biodiésel, GN, H<sub>2</sub> y mezclas GN-H<sub>2</sub>, presenta ventajas en términos de reducción de emisiones, eficiencia y diversificación de la matriz energética. Sin embargo, también existen desafíos relacionados con una infraestructura de producción y suministro de los combustibles de origen renovable evaluados en este trabajo. La viabilidad y la conveniencia del uso de estos combustibles surgirá de factores como su disponibilidad, los incentivos gubernamentales, la infraestructura existente y los requisitos específicos de cada aplicación.

## 7. Agradecimientos

Los autores de este libro expresamos nuestra gratitud a los profesores y al personal técnico del Laboratorio de Ciencias Térmicas de la Institución Universitaria ITM por brindarnos sus instalaciones para el trabajo experimental; así mismo, a la Institución Universitaria Pascual Bravo por la facilitación de espacios, material, equipos y recursos monetarios, bajo el marco de los proyectos titulados «Evaluación experimental del efecto del uso de mezclas gas natural e hidrógeno sobre el desempeño de un MEC en modo dual» con código IN202101, y «Estudio del efecto del gas metano en la operación de un motor dual trabajando con Biodiésel como combustible principal para la generación de energía eléctrica» con código IN201617. Finalmente, agradecemos a Juan Diego Vargas Laverde por el apoyo durante la ejecución de la fase experimental de los proyectos.

## Glosario de palabras

### A

**Ácidos grasos:** tipo de compuesto orgánico formado principalmente por una cadena de carbono y átomos de hidrógeno con un grupo carboxilo en un extremo, que es un elemento fundamental de los lípidos.

### B

**Balance de energía:** declaración de la ley de conservación de la energía que establece que la energía total en un sistema cerrado permanece constante con el tiempo, lo que implica que la energía que entra en un sistema debe ser igual a la energía que sale de este más la energía almacenada dentro de él.

**Balance de masa:** principio físico que establece que la cantidad total de masa en un sistema cerrado permanece constante con el tiempo, lo que implica que la masa que entra en un sistema debe ser igual a la masa que sale de este más la masa almacenada dentro de él.

**Bomba calorimétrica:** dispositivo utilizado para medir la cantidad de calor liberado o absorbido en una reacción química o en un proceso físico, utilizando el principio de conservación de la energía.

### C

**Combustibles alternativos:** tipo de combustible que se utiliza como alternativa a los combustibles fósiles tradicionales, como la gasolina o el diésel, y que generalmente se deriva de fuentes renovables o sostenibles como biocombustibles, hidrógeno, electricidad, entre otros.

**Composición equivalente:** proporción molar relativa de los elementos que forman un compuesto químico en comparación con su fórmula química.

**Condiciones adiabáticas:** condiciones presentes en un proceso termodinámico en el cual no hay transferencia de calor entre un sistema y su entorno, lo que implica que la entropía del sistema permanece constante.

**Consumo específico:** cantidad de combustible consumido por unidad de trabajo realizado, comúnmente expresado en términos de masa o volumen de combustible por unidad de potencia generada.

### D

**Densímetro:** instrumento utilizado para medir la densidad relativa de un líquido en comparación con la densidad del agua, generalmente utilizado en las industrias petrolera, química y de alimentos.

## E

**Eficiencia térmica:** proporción de la energía útil generada por un sistema en relación con la energía total consumida por este, generalmente expresada como un porcentaje.

**Eficiencia volumétrica:** relación entre el volumen real de gas que ingresa o sale de un cilindro en un motor de combustión interna y el volumen teórico ideal basado en las dimensiones del cilindro y la carrera del pistón.

**Electrolisis:** proceso químico en el cual una corriente eléctrica se utiliza para descomponer una sustancia en sus componentes más simples, generalmente en forma de iones.

**Energía química:** forma de energía almacenada en las estructuras químicas de las moléculas que se libera o absorbe durante una reacción química.

**Energía térmica:** forma de energía asociada con la temperatura de un objeto o sistema, que se transfiere entre cuerpos debido a una diferencia de temperatura.

**Entalpía de formación:** cantidad de calor liberada o absorbida cuando se forma una molécula de un compuesto a partir de sus elementos constituyentes en sus estados estándar, generalmente a 25°C y 1 atmósfera de presión.

**Entalpía de vaporización del agua:** cantidad de calor necesaria para convertir una unidad de masa de agua líquida en vapor de agua a la misma tempera-

tura y presión, expresada en julios por mol o en calorías por gramo.

**Entalpía sensible:** cantidad de calor absorbida o liberada por un sistema sin cambio de fase, generalmente asociada con cambios de temperatura.

## F

**Fórmula química:** representación simbólica que describe la composición química de un compuesto mediante la identificación de los elementos y el número de átomos de cada uno presentes en la molécula.

**Fracción másica:** proporción de la masa de un componente específico con respecto a la masa total de una mezcla.

**Fracción molar:** proporción de la cantidad de una sustancia en una mezcla con respecto a la cantidad total de sustancias presentes en ella, expresada como un número adimensional entre 0 y 1.

**Fracción volumétrica:** proporción del volumen de un componente específico en relación con el volumen total de una mezcla.

## G

**Grupo electrógeno:** dispositivo que convierte energía mecánica en energía eléctrica mediante el uso de un motor de combustión interna acoplado a un generador eléctrico.

## K

**Knocking:** fenómeno no deseado en los motores de combustión interna, caracterizado por una combustión irregular o explosiva, causado por la ignición prematura de la mezcla aire-combustible que produce daños al motor.

## L

**Ley de conservación de la materia:** principio fundamental de la física que establece que la masa total de un sistema cerrado permanece constante con el tiempo, lo que implica que la masa no puede ser creada ni destruida, solo transformada en diferentes formas.

**Ley de volúmenes aditivos de Amagat:** esta ley establece que el volumen total de una mezcla de gases es igual a la suma de los volúmenes parciales ocupados por cada gas individualmente, a una temperatura y presión dadas.

## M

**Masa atómica:** masa promedio de un átomo de un elemento que considera la abundancia relativa de sus isótopos naturales y su peso atómico.

**Masa molar:** masa de una sustancia expresada en gramos por mol, que se calcula sumando las masas atómicas de todos los átomos presentes en una molécula.

**Masa molecular:** masa total de una molécula, calculada sumando las masas

atómicas de todos los átomos que la componen.

**Microgeneración:** producción descentralizada de energía eléctrica en una escala pequeña, generalmente en hogares o pequeñas comunidades, que utiliza fuentes de energía renovable como solar, eólica, hidroeléctrica, entre otras.

## N

**Número de moles:** medida de la cantidad de sustancia que contiene un sistema, esta unidad permite expresar cantidades de átomos, moléculas o partículas en una escala macroscópica.

## P

**Porcentaje de sustitución:** proporción de un componente o sustancia que se sustituye por otro en una mezcla o reacción química, expresado como un porcentaje del componente original, estos se pueden dar en base energética o másica.

**Propiedades de combustión:** características físicas y químicas de un combustible relacionadas con su capacidad para quemarse, como el poder calorífico, la velocidad de combustión, temperatura de ignición, etc.

**Propiedades termofísicas:** características de un material que describen su comportamiento en relación con el calor y la temperatura, como la conductividad térmica, la densidad, el calor específico, entre otros.

## R

**Retroceso de llama:** fenómeno en el cual la llama de una combustión se mueve en la dirección opuesta a la propagación normal de la misma, generalmente debido a condiciones de combustión inestables.

## S

**Sensor infrarrojo no dispersivo:** tipo de sensor utilizado para detectar gases en el aire basado en la absorción de la luz infrarroja por los componentes del gas.

**Sensor paramagnético:** dispositivo que detecta la presencia de ciertos gases mi-

diendo los cambios en la susceptibilidad magnética del gas cuando está expuesto a un campo magnético.

## T

**Transesterificación** proceso químico en el cual un éster es transformado en otro éster mediante la reacción con un alcohol en presencia de un catalizador.

**Triacetina:** compuesto químico que se utiliza como plastificante y disolvente en diversas aplicaciones industriales, también conocido como glicerina triacetato.

## Referencias

- [1] F. E. Sierra Vargas, J. E. Arango Gómez, y S. Pérez Súa, «Comportamiento de un motor diesel de 1105HP operado mediante el sistema “Dual-Fuel” con diesel-gas natural en campos petroleros», *Inf. Téc.*, vol. 78, n.º 1, pp. 25-36, 2014.
- [2] I. M. Youn, S. H. Park, H. G. Roh, y C. S. Lee, «Investigation on the fuel spray and emission reduction characteristics for dimethyl ether (DME) fueled multi-cylinder diesel engine with common-rail injection system», *Fuel Process. Technol.*, vol. 92, n.º 7, pp. 1280-1287, jul. 2011, doi: 10.1016/j.fuproc.2011.01.018.
- [3] M. Crippa, G. Janssens-Maenhout, D. Guizzardi, y S. Galmarini, «EU effect: Exporting emission standards for vehicles through the global market economy», *J. Environ. Manage.*, vol. 183, pp. 959-971, dic. 2016, doi: 10.1016/j.jenvman.2016.09.068.
- [4] R. A. Alenezi, A. M. Norkhizan, R. Mamat, Erdiwansyah, G. Najafi, y M. Mazlan, «Investigating the contribution of carbon nanotubes and diesel-bio-diesel blends to emission and combustion characteristics of diesel engine», *Fuel*, vol. 285, p. 119046, feb. 2021, doi: 10.1016/j.fuel.2020.119046.
- [5] H. Venu, L. Subramani, y V. D. Raju, «Emission reduction in a DI diesel engine using exhaust gas recirculation (EGR) of palm biodiesel blended with TiO2 nano additives», *Renew. Energy*, vol. 140, pp. 245-263, sep. 2019, doi: 10.1016/j.renene.2019.03.078.
- [6] E. Khalife, M. Tabatabaei, A. Demirbas, y M. Aghbashlo, «Impacts of additives on performance and emission characteristics of diesel engines during steady state operation», *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 59, pp. 32-78, mar. 2017, doi: 10.1016/j.pecs.2016.10.001.
- [7] M. Lapuerta, J. Rodríguez-Fernández, Á. Ramos, D. Donoso, y L. Canoira, «Hydrogenated terpenic renewable fuels: Emissions and combustion analysis», *Renew. Energy*, vol. 208, pp. 152-161, may 2023, doi: 10.1016/j.renene.2023.03.069.
- [8] J. J. Hernández, A. Cova-Bonillo, A. Ramos, H. Wu, y J. Rodríguez-Fernández, «Autoignition of sustainable fuels under dual operation with H<sub>2</sub>-carriers in a constant volume combustion chamber», *Fuel*, vol. 339, p. 127487, may 2023, doi: 10.1016/j.fuel.2023.127487.
- [9] K. Cacia, L. Olmos-Villalba, B. Herrera, y A. Gallego, «Experimental evaluation of a diesel-biogas dual fuel engine operated on micro-trigeneration system for power, drying and cooling», *Appl. Therm. Eng.*, vol. 100, pp. 762-767, may 2016, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2016.02.067.
- [10] K. Cacia, A. Amell, y F. Cadavid, «Effects of oxygen enriched air on the operation and performance of a diesel-biogas dual fuel engine», *Biomass Bioenergy*, vol. 45, pp. 159-167, oct. 2012, doi: 10.1016/j.biombioe.2012.06.003.

- [11] B. Yang, L. Ning, B. Liu, G. Huang, Y. Cui, y K. Zeng, «Comparison study the particulate matter characteristics in a diesel/natural gas dual-fuel engine under different natural gas-air mixing operation conditions», *Fuel*, vol. 288, p. 119721, mar. 2021, doi: 10.1016/j.fuel.2020.119721.
- [12] A. Yousefi, H. Guo, y M. Birouk, «Effect of diesel injection timing on the combustion of natural gas/diesel dual-fuel engine at low-high load and low-high speed conditions», *Fuel*, vol. 235, pp. 838-846, ene. 2019, doi: 10.1016/j.fuel.2018.08.064.
- [13] I. D. Bedoya Caro, A. A. Arrieta, F. J. Cadavid, y J. A. Pareja, «Efecto del grado de carga y la cantidad del combustible piloto en el comportamiento mecánico ambiental de un motor dual diesel-biogás para generación de electricidad», *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia*, n.º 42, pp. 79-93, dic. 2007.
- [14] R. G. Papagiannakis y D. T. Hountalas, «Combustion and exhaust emission characteristics of a dual fuel compression ignition engine operated with pilot Diesel fuel and natural gas», *Energy Convers. Manag.*, vol. 45, n.º 18-19, pp. 2971-2987, nov. 2004, doi: 10.1016/j.enconman.2004.01.013.
- [15] R. Uma, T. Kandpal, y V. V. N. Kishore, «Emission characteristics of an electricity generation system in diesel alone and dual fuel modes», *Biomass Bioenergy*, vol. 27, pp. 195-203, ago. 2004, doi: 10.1016/j.biombioe.2004.01.003.
- [16] Y. Bayat y M. Ghazikhani, «Experimental investigation of compressed natural gas using in an indirect injection diesel engine at different conditions», *J. Clean. Prod.*, vol. 271, p. 122450, oct. 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.122450.
- [17] S. Bari y S. N. Hossain, «Performance of a diesel engine run on diesel and natural gas in dual-fuel mode of operation», *Energy Procedia*, vol. 160, pp. 215-222, feb. 2019, doi: 10.1016/j.egypro.2019.02.139.
- [18] S. Akansu, Z. Dulger, N. Kahraman, y N. Veziroglu, «Internal combustion engines fueled by natural gas-hydrogen mixtures», *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 29, n.º 14, pp. 1527-1539, nov. 2004, doi: 10.1016/j.ijhydene.2004.01.018.
- [19] F. M. Felayati, Semin, B. Cahyono, R. A. Bakar, y M. Birouk, «Performance and emissions of natural gas/diesel dual-fuel engine at low load conditions: Effect of natural gas split injection strategy», *Fuel*, vol. 300, p. 121012, sep. 2021, doi: 10.1016/j.fuel.2021.121012.
- [20] A. Kleinová, I. Vailing, J. Lábaj, J. Mikulec, y J. Cvengroš, «Vegetable oils and animal fats as alternative fuels for diesel engines with dual fuel operation», *Fuel Process. Technol.*, vol. 92, n.º 10, pp. 1980-1986, oct. 2011, doi: 10.1016/j.fuproc.2011.05.018.
- [21] R. Jatoth, S. K. Gugulothu, y G. Ravi Kiran Sastry, «Experimental study of using biodiesel and low cetane alcohol as the pilot fuel on the performance and emission trade-off study in the diesel/compressed natural gas dual fuel combustion mode», *Energy*, vol. 225, p. 120218, jun. 2021, doi: 10.1016/j.energy.2021.120218.

- [22] C.-A. Forero-Núñez, J. Eduardo-Arango, y F.-E. Sierra-Vargas, «Evaluación energética de un sistema de generación de 400 kWe en modo diesel-gas licuado de petróleo», *Ing. Mecánica*, vol. 17, n.º 3, pp. 205-215, dic. 2014.
- [23] S. Acha *et al.*, «Fuel cells as combined heat and power systems in commercial buildings: A case study in the food-retail sector», *Energy*, vol. 206, p. 118046, sep. 2020, doi: 10.1016/j.energy.2020.118046.
- [24] A. Arsalis, «A comprehensive review of fuel cell-based micro-combined-heat-and-power systems», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 105, pp. 391-414, may 2019, doi: 10.1016/j.rser.2019.02.013.
- [25] D. Hart, J. Howes, B. Madden, y E. Boyd, «Hydrogen and Fuel Cells: Opportunities for Growth - A Roadmap for the UK», E4tech. Accedido: 25 de mayo de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.e4tech.com/resources/126-hydrogen-and-fuel-cells-opportunities-for-growth-a-roadmap-for-the-uk.php>
- [26] M. Lehner, R. Tichler, H. Steinmüller, y M. Koppe, *Power-to-Gas: Technology and Business Models*. en SpringerBriefs in Energy. Cham: Springer International Publishing, 2014. doi: 10.1007/978-3-319-03995-4.
- [27] N. Mata Moína, «Estudio del comportamiento del hidrógeno inyectado en la red de gas natural», 2022, Accedido: 25 de mayo de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.comillas.edu/xmlui/handle/11531/69812>
- [28] A. I. Jabbr, W. S. Vaz, H. A. Khairallah, y U. O. Koylu, «Multi-objective optimization of operating parameters for hydrogen-fueled spark-ignition engines», *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 41, n.º 40, pp. 18291-18299, oct. 2016, doi: 10.1016/j.ijhydene.2016.08.016.
- [29] P. Dimitriou y T. Tsujimura, «A review of hydrogen as a compression ignition engine fuel», *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 42, n.º 38, pp. 24470-24486, sep. 2017, doi: 10.1016/j.ijhydene.2017.07.232.
- [30] «The Statistical Review of World Energy analyses data on world energy markets from the prior year. The Review has been providing timely, comprehensive and objective data to the energy community since 1952.», *bp*, vol. 71, 2022, Accedido: 1 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2022-full-report.pdf>
- [31] S. Lee, J. G. Speight, y S. K. Loyalka, *Handbook of Alternative Fuel Technologies, Second Edition*. CRC Press, 2014.
- [32] Y. Cuéllar Álvarez, «Análisis de Ciclo de Vida para diferentes fuentes energéticas usadas en los vehículos de transporte de pasajeros de la ciudad de Bogotá». 2016. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/56442/2562130.2016.pdf?sequence=1>
- [33] D. Morales Soler, «Demanda de diésel jalonó crecimiento de 24% en consumo de biodiésel el año pasado», *Diario La República*. Accedido: 1 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.larepublica.co/economia/demanda-de-diesel-jalono-crecimiento-de-24-en-consumo-de-biodiesel-el-año-pasado-3300710>

- [34] J. F. Romero Muñoz, «¿Qué tan lejos estamos de consumir biodiesel? Oferta y Demanda del biodiesel en México», jun. 2017, Accedido: 1 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.12371/9197>
- [35] B. S. Chauhan, N. Kumar, H. M. Cho, y H. C. Lim, «A study on the performance and emission of a diesel engine fueled with Karanja biodiesel and its blends», *Energy*, vol. 56, pp. 1-7, jul. 2013, doi: 10.1016/j.energy.2013.03.083.
- [36] A. Paul, R. S. Panua, D. Debroy, y P. K. Bose, «Effect of compressed natural gas dual fuel operation with diesel and Pongamia pinnata methyl ester (PPME) as pilot fuels on performance and emission characteristics of a CI (compression ignition) engine», *Energy*, vol. 68, pp. 495-509, abr. 2014, doi: 10.1016/j.energy.2014.03.026.
- [37] J. A. A. Alvarez, «Obtención de biodiesel a partir de aceites usados en casa habitación de la comunidad del Refugio», 2013.
- [38] «Normatividad nacional de biocombustibles», Federación Nacional de Biocombustibles. Accedido: 1 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://fedebiocombustibles.com/normatividad/>
- [39] A. Rojas-González y E. Girón-Gallego, «Variables de operación en el proceso de transesterificación de grasas animales: una revisión», *Ing. Univ.*, vol. 15, n.º 1, pp. 197-218, 2011.
- [40] M. R. Avhad y J. M. Marchetti, «A review on recent advancement in catalytic materials for biodiesel production», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 50, pp. 696-718, oct. 2015, doi: 10.1016/j.rser.2015.05.038.
- [41] L. Tarabet, M. S. Lounici, K. Loubar, K. Khiari, R. Bouguessa, y M. Tazerout, «Hydrogen supplemented natural gas effect on a DI diesel engine operating under dual fuel mode with a biodiesel pilot fuel», *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 43, n.º 11, pp. 5961-5971, 2018, doi: 10.1016/j.ijhydene.2017.09.045.
- [42] H. Guo, W. S. Neill, y B. Liko, «An Experimental Investigation on the Combustion and Emissions Performance of a Natural Gas–Diesel Dual Fuel Engine at Low and Medium Loads», en *Volume 1: Large Bore Engines; Fuels; Advanced Combustion*, Houston, Texas, USA: American Society of Mechanical Engineers, nov. 2015, p. V001T03A005. doi: 10.1115/ICEF2015-1041.
- [43] H. Song *et al.*, «A comparative study of using diesel and PODeN as pilot fuels for natural gas dual-fuel combustion», *Fuel*, vol. 188, pp. 418-426, ene. 2017, doi: 10.1016/j.fuel.2016.10.051.
- [44] L. Tarabet, K. Loubar, M. S. Lounici, K. Khiari, T. Belmrabet, y M. Tazerout, «Experimental investigation of DI diesel engine operating with eucalyptus biodiesel/natural gas under dual fuel mode», *Fuel*, vol. 133, pp. 129-138, oct. 2014, doi: 10.1016/j.fuel.2014.05.008.
- [45] J. Manna, «Chapter 7.2 - Overview on application of hydrogen», en *Towards Hydrogen Infrastructure*, D. Jaiswal-Nagar, V. Dixit, y S. Devasahayam, Eds., Elsevier, 2024, pp. 401-430. doi: 10.1016/B978-0-323-95553-9.00006-6.

- [46] J. Manna, «Chapter 1.1 - Hydrogen economy and international hydrogen strategies», en *Towards Hydrogen Infrastructure*, D. Jaiswal-Nagar, V. Dixit, y S. Devasahayam, Eds., Elsevier, 2024, pp. 3-38. doi: 10.1016/B978-0-323-95553-9.00009-1.
- [47] A. Aghakhani, N. Haque, C. Saccani, M. Pellegrini, y A. Guzzini, «Chapter 4.1 - Hydrogen transportation and distribution», en *Towards Hydrogen Infrastructure*, D. Jaiswal-Nagar, V. Dixit, y S. Devasahayam, Eds., Elsevier, 2024, pp. 187-224. doi: 10.1016/B978-0-323-95553-9.00003-0.
- [48] P. Lv, «Chapter 3.3 - Hydrogen storage technology», en *Towards Hydrogen Infrastructure*, D. Jaiswal-Nagar, V. Dixit, y S. Devasahayam, Eds., Elsevier, 2024, pp. 165-184. doi: 10.1016/B978-0-323-95553-9.00001-7.
- [49] W. Tutak, A. Jamrozik, y K. Grab-Rogaliński, «Effect of natural gas enrichment with hydrogen on combustion process and emission characteristic of a dual fuel diesel engine», *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 45, n.º 15, pp. 9088-9097, mar. 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.01.080.
- [50] J. Zareei, M. Haseeb, K. Ghadamkheir, S. A. Farkhondeh, A. Yazdani, y K. Ershov, «The effect of hydrogen addition to compressed natural gas on performance and emissions of a DI diesel engine by a numerical study», *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 45, n.º 58, pp. 34241-34253, nov. 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.09.027.
- [51] C. F. Bolaños Badía, «Almacenamiento del Hidrógeno», *Energética Hidrógeno Contexto Estado Actual Perspect. Futuro*, pp. 127-149, 2005.
- [52] «Hydrogen Delivery», Energy.gov. Accedido: 1 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-delivery>
- [53] Z. Yaakob, M. Mohammad, M. Alherbawi, Z. Alam, y K. Sopian, «Overview of the production of biodiesel from Waste cooking oil», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 18, pp. 184-193, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.10.016>.
- [54] Grupo Energía Bogotá, «Transportadora de Gas Internacional», Reporte de cromatografías específicas Sebastopol. Accedido: 23 de mayo de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.tgi.com.co/>
- [55] B. B. He y S. W. Pryor, «Biodiesel from Oils and Fats», *Holden N M Wolfe M Ogejo J Cummins E J Ed*, 2020, doi: <https://doi.org/10.21061/IntroBiosystemsEngineering/Biodiesel>.
- [56] ASTM, «ASTM», *ASTM D-6751-02 Standard Specification for Biodiesel Fuel (B100). Blend Stock for Distillate Fuels*. 2002. Accedido: 23 de mayo de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.astm.org/d6751-20a.html>
- [57] ASTM, «ASTM D240-19 Standard Test Method for Heat of Combustion of Liquid Hydrocarbon Fuels by Bomb Calorimeter». Accedido: 31 de mayo de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.astm.org/d0240-19.html>
- [58] S. M. Lopes, R. Furey, y P. Geng, «Calculation of Heating Value for Diesel Fuels Containing Biodiesel», *SAE Int. J. Fuels Lubr.*, vol. 6, n.º 2, pp. 407-418, 2013.
- [59] Y. A. Çengel y M. A. Boles, *TERMODINAMICA*, (9a. ed.). 2019.

- [60] W. M. Adaileh y K. S. AlQdah, «Performance of Diesel Engine Fuelled by a Biodiesel Extracted From A Waste Coking Oil», *Energy Procedia*, vol. 18, pp. 1317-1334, 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.05.149>.
- [61] P. Rounce, A. Tsolakis, y A. P. E. York, «Speciation of particulate matter and hydrocarbon emissions from biodiesel combustion and its reduction by aftertreatment», *Fuel*, vol. 96, pp. 90-99, 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.12.071>.
- [62] H. A. Alrazen, A. R. Abu Talib, R. Adnan, y K. A. Ahmad, «A review of the effect of hydrogen addition on the performance and emissions of the compression – Ignition engine», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 54, pp. 785-796, feb. 2016, doi: [10.1016/j.rser.2015.10.088](https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.088).
- [63] M. Deb, G. R. K. Sastry, P. K. Bose, y R. Banerjee, «An experimental study on combustion, performance and emission analysis of a single cylinder, 4-stroke DI-diesel engine using hydrogen in dual fuel mode of operation», *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 40, n.º 27, pp. 8586-8598, jul. 2015, doi: [10.1016/j.ijhydene.2015.04.125](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.04.125).
- [64] M. T. Zarrinkolah y V. Hosseini, «Methane slip reduction of conventional dual-fuel natural gas diesel engine using direct fuel injection management and alternative combustion modes», *Fuel*, vol. 331, p. 125775, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.125775>.
- [65] S. Wang *et al.*, «The environmental potential of hydrogen addition as complementation for diesel and biodiesel: A comprehensive review and perspectives», *Fuel*, vol. 342, p. 127794, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.127794>.
- [66] A. Nemati, V. Fathi, R. Barzegar, y S. Khalilarya, «Numerical investigation of the effect of injection timing under various equivalence ratios on energy and exergy terms in a direct injection SI hydrogen fueled engine», *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 38, n.º 2, pp. 1189-1199, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.10.083>.
- [67] B. Haragopala Rao, K. N. Shrivastava, y H. N. Bhakta, «Hydrogen for dual fuel engine operation», *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 8, n.º 5, pp. 381-384, ene. 1983, doi: [10.1016/0360-3199\(83\)90054-X](https://doi.org/10.1016/0360-3199(83)90054-X).
- [68] R. Meneca y I. D. Beyoda Caro, «Una revisión del uso del hidrógeno en motores de encendido por compresión diésel) y un análisis de su posible uso en motores duales en Colombia», *UIS Ing*, vol. 21, n.º 3, pp. 33-54, jun. 2022, doi: <https://doi.org/10.18273/revuin.v21n3-2022004>.

En este libro se presenta una metodología para el cálculo del rendimiento y de los índices de emisión de un MEC para microgeneración que opera en modo dual y que usa biodiésel y GN enriquecido con H<sub>2</sub>. Este trabajo permite a los lectores entender los procedimientos de cálculo necesarios para determinar algunas variables de operación de un MEC tales como el consumo específico de combustible, el nivel de sustitución, la eficiencia térmica y los índices de emisión de gases contaminantes, teniendo en cuenta el consumo de los combustibles –líquido y gaseosos–, la potencia eléctrica generada y las emisiones de CO<sub>2</sub>, CO y NO<sub>x</sub>, en los gases de escape.

VIGILADA Mineducación

 **IUPascualBravo**  
[www.pascualbravo.edu.co](http://www.pascualbravo.edu.co)

**Teléfono:** 604 448 05 20

Calle 73 # 73a - 226 Robledo, Vía El Volador  
Medellín - Colombia



**Alcaldía de Medellín**  
Distrito de  
Ciencia, Tecnología e Innovación