



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ENERGÍA

**ESTUDIO AMBIENTAL Y TÉCNICO DEL USO DEL BIODIÉSEL EN
MOTORES**

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
YONATHAN URIEL FLORES DE LEÓN

TUTORA PRINCIPAL
DRA. ALEJANDRA CASTRO GONZÁLEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX., ENERO 2022



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO DESIGNADO

PRESIDENTE: DR. JOSÉ LUIS FERNÁNDEZ ZAYAS

SECRETARIO: DRA. M. AZUCENA ESCOBEDO
IZQUIERDO

1ER. VOCAL: DRA. ALEJANDRA CASTRO
GONZÁLEZ

2DO. VOCAL: M.I. AUGUSTO SÁNCHEZ CIFUENTES

3ER. VOCAL: M.C. EDGAR SALAZAR SALAZAR

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

LABORATORIO DE PRODUCCIÓN Y UTILIZACIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES (LAEL) DE POSGRADO Y EL LABORATORIO DE MÁQUINAS TÉRMICAS, AMBOS, PERTENECIENTES A LA FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO, CIUDAD UNIVERSITARIA, CIUDAD DE MÉXICO.

ASESORA DEL TEMA:

Dra. Alejandra Castro González

SUSTENTANTE:

Yonathan Uriel Flores de León

AGRADECIMIENTOS

- Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por su apoyo a los estudiantes de posgrado.
- A la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), por ser la máxima casa de estudios, en la que me forjé como profesional, primeramente, como ingeniero mecánico, y ahora como maestro en ingeniería.
- Al Posgrado de Ingeniería por abrirme las puertas al conocimiento y contribuir a mi formación académica y humana.
- A la Dra. Alejandra Castro González por su dedicación, interés y apoyo para desarrollar este proyecto.
- Al ingeniero Vicente López Fernández, jefe del laboratorio de máquinas térmicas, por permitirme hacer uso de las instalaciones todas las veces que lo necesité.
- A mi madre, Araceli de León Cortés y mi hermana, Yaazanya Selene Flores, por su motivación y apoyo, no solo para iniciar y terminar este proyecto, sino también por ser los pilares en mi formación académica durante estos últimos años.
- A Daniela Muñoz Cortes por ser una de las personas más importantes de mi vida, por estar siempre a mi lado sin importar las circunstancias, por su apoyo, cariño y amor incondicional. Además de tomarse el tiempo de revisar y corregir este trabajo.
- A los sinodales, M.I. Sánchez Cifuentes Augusto, Dra. Escobedo Izquierdo M. Azucena, M.C. Salazar Salazar Edgar y Dr. Fernández Zayas José Luis, por aceptar el compromiso y por tomarse la molestia de leer este trabajo y darme sus valiosas observaciones.
- A mis profesores de licenciatura y de maestría por sus conocimientos, enseñanzas, tiempo y dedicación.
- A mi abuelito, Emiliano de León Cárdenas (†), por ser, siempre, un guerrero en esta vida y ser mi ejemplo de alegría, fortaleza, responsabilidad y cariño.
- A mis colegas y amigos por su valiosa amistad y esos buenos momentos que nos ayudaban a salir de la monotonía.

Muchas gracias a todos ustedes.

ÍNDICE

Índice de figuras	VII
Índice de tablas	XI
Resumen	XII
Introducción	XIII
Objetivos	XIV

CAPÍTULO 1 ANTECEDENTES

1.1 Biocombustibles	1
1.1.1 Biocombustibles de primera generación (1G)	1
1.1.2 Biocombustibles de segunda generación (2G)	1
1.1.3 Biocombustibles de tercera generación (3G)	2
1.1.4 Biocombustibles de cuarta generación (4G)	3
1.2 Generalidades del biodiésel	3
1.3 Norma ASTM D6751	4
1.4 Biodiésel en el mundo	5
1.4.1 Unión Europea	8
1.4.2 Estados Unidos	9
1.4.3 América Latina	10
1.4.3.1 Argentina	10
1.4.3.2 Brasil	11
1.4.3.3 Colombia	13
1.4.3.4 Perú	14
1.4.3.5 Guatemala	14
1.5 Biodiésel en México	15
1.6 Obtención del biodiésel	18
1.7 Uso de biodiésel en motores de combustión interna	21
1.8 Emisiones contaminantes del biodiésel	22

CAPÍTULO 2 FUNDAMENTOS

2.1 Historia de los motores de combustión interna	25
2.2 Elementos que componen un motor de combustión interna	32
2.2.1 Elementos estáticos	32
2.2.1.1 Bloque motor	32
2.2.1.2 Cilindros	33
2.2.1.3 Cáster	33
2.2.1.4 Culata	34
2.2.1.5 Colectores	35
2.2.2 Elementos móviles	35
2.2.2.1 Pistón	35
2.2.2.2 Segmentos del pistón	37
2.2.2.3 Biela	38
2.2.2.4 Cigüeñal	39
2.2.2.5 Volante motor	40
2.2.2.6 Dámper	41
2.3 Ciclo diésel ideal (teórico)	41
2.3.1 Rendimiento del ciclo diésel	44
2.3.2 Diferencias entre el ciclo diésel ideal y el real	46
2.4 Ventajas y desventajas relacionadas con el combustible diésel	48
2.5 Ventajas y desventajas relacionadas con el biodiésel	50

CAPÍTULO 3 MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Caso de estudio	52
3.2 Producción del biodiésel	53
3.3 Pruebas en el motor	54
3.4 Medición de emisiones	57
3.5 Metodología	58

CAPÍTULO 4 RESULTADOS

4.1 Producción de biodiesel	60
-----------------------------	----

4.2	Parámetros de Medición	62
4.3	Pruebas en el motor	64
4.3.1	Primer prueba (combustible diésel)	64
4.3.2	Segunda prueba (biodiésel B10)	67
4.4	Operación del equipo de medición de emisiones y lectura de emisiones contaminantes	70
4.5	Análisis de resultados	85
	CONCLUSIONES	92
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	94

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	Ranking mundial de los principales países productores de biocombustibles	3
Figura 1.2	Capacidad y producción mundial de biodiésel, de 2002 a 2008	7
Figura 1.3	Ranking mundial de los principales países productores de biodiésel en 2019	7
Figura 1.4	Tendencia y producción total, en miles de m ³ , de biodiésel en el mundo	8
Figura 1.5	Materia prima para la producción de biodiésel en Estados Unidos	10
Figura 1.6	Producción de biodiésel en Argentina, de 2019 a 2023	11
Figura 1.7	Producción de biodiésel en Brasil, de 2019 a 2023	12
Figura 1.8	Evolución de la capacidad instalada y de la producción de biodiésel en Colombia de 2009 a 2019	13
Figura 1.9	Reacción química de la transesterificación	20
Figura 1.10	Tendencia mundial de publicación, por año, sobre la aplicación de biodiésel en motores diésel	22
Figura 2.1	Motor de Robert Stirling	25
Figura 2.2	Motor del reverendo W. Cecil	26
Figura 2.3	Motor de William Barnett	27
Figura 2.4	Máquina de gas de Lenoir	28
Figura 2.5	Vehículo Daimler-Maybach	29
Figura 2.6	Benz Patent-Motorwagen	30
Figura 2.7	Primer vehículo comercializado por la empresa Panhard-Levassor, con motor a gasolina	30
Figura 2.8	Motor de Rudolph Christian Karl Diesel	31
Figura 2.9	Bloque motor	32
Figura 2.10	Cilindro de un motor	33
Figura 2.11	Cárter de un motor de combustión interna	34
Figura 2.12	Culata o cabeza para motor 4 cilindros	35

Figura 2.13	El pistón y sus partes	36
Figura 2.14	Esquema de las principales configuraciones de los segmentos de un pistón	38
Figura 2.15	La biela y sus partes	39
Figura 2.16	Cigüeñal y bloque de un motor cuatro cilindros	40
Figura 2.17	Volante motor	41
Figura 2.18	Diagrama presión (P)-volumen (V) y temperatura (T)-entropía (S) del ciclo diésel ideal	42
Figura 2.19	Diagrama presión - volumen ideal (teórico) y real (indicado) del ciclo diésel	46
Figura 3.1	Conjunto generador, con motor GMC diésel, modelo 2150 (vista isométrica)	55
Figura 3.2	Conjunto generador con motor GMC diésel modelo 2150 (Vista lateral)	55
Figura 3.3	Equipo F5000 de E INSTRUMENTS	57
Figura 3.4	Diagrama de la metodología	59
Figura 4.1	Reacción estequiométrica del biodiésel	61
Figura 4.2	Muestra de biodiésel con glicerina	62
Figura 4.3	Ubicación del tanque de combustible y probeta del motor GMC 2150	64
Figura 4.4	Configuración de parámetros en el analizador	70
Figura 4.5	Ejemplo de lectura de parámetros medidos	70
Figura 4.6	Cantidad de oxígeno arrojado en la prueba con combustible diésel y con biodiésel B10	71
Figura 4.7	Cantidad de monóxido de carbono emanado en la prueba con combustible diésel y con biodiésel B10	72
Figura 4.8	Cantidad de dióxido de carbono emitido en la prueba con combustible diésel y con biodiésel B10	72
Figura 4.9	Lectura de hidrocarburos no quemados, en partes por millón, en la prueba con combustible diésel y con biodiésel B10	73

Figura 4.10	Lectura de óxidos de nitrógeno, en partes por millón, en la prueba con combustible diésel y con biodiésel B10	73
Figura 4.11	Comportamiento de la línea de tendencia polinómica de 6to orden sobre la lectura de datos del oxígeno de la primer prueba	75
Figura 4.12	Comportamiento de la línea de tendencia polinómica de 7mo orden sobre la lectura de datos del oxígeno de la segunda prueba	76
Figura 4.13	Lectura de dióxido de carbono presente en la primer prueba	77
Figura 4.14	Comportamiento de la línea de tendencia polinómica de 6to orden sobre la lectura de datos del dióxido de carbono de la primer prueba	78
Figura 4.15	Lectura de dióxido de carbono presente en las emisiones de la segunda prueba	79
Figura 4.16	Comportamiento de la línea de tendencia polinómica de 6to orden sobre la lectura de datos del dióxido de carbono de la segunda prueba	79
Figura 4.17	Lectura de monóxido de carbono presente en las emisiones de la primer prueba	80
Figura 4.18	Lectura de monóxido de carbono presente en las emisiones de la segunda prueba	81
Figura 4.19	Lectura de óxidos de nitrógeno, en partes por millón, en la primer prueba	81
Figura 4.20	Comportamiento de la línea de tendencia polinómica de 6to orden sobre la lectura de datos de óxidos de nitrógeno de la primer prueba	82
Figura 4.21	Comportamiento de la línea de tendencia polinómica de 6to orden sobre la lectura de datos de óxidos de nitrógeno de la segunda prueba	83
Figura 4.22	Lectura de hidrocarburos no quemados, presentes en la primer prueba, en partes por millón	84

Figura 4.23	Lectura de hidrocarburos no quemados, presentes en la segunda prueba, en partes por millón	84
Figura 4.24	Motor Mercedes Benz, modelo OM366LA	89
Figura 4.25	PEMS, de la marca AXION	89

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1	Producción de biodiésel por países, en millones de litros	6
Tabla 1.2	Producción de cultivos oleaginosos en México en 2016	16
Tabla 1.3	Plantas comerciales de biodiésel en México	17
Tabla 3.1	Especificaciones del biodiésel B100	54
Tabla 4.1	Resultados promedio del triplicado de la caracterización físicoquímica del biodiésel generado para las pruebas experimentales	63
Tabla 4.2	Datos obtenidos de la primer prueba (combustible diésel)	65
Tabla 4.3	Dimensiones de la probeta graduada del depósito del combustible	65
Tabla 4.4	Datos obtenidos de la segunda prueba (biodiésel B10)	68
Tabla 4.5	Resultados de las pruebas con diésel y biodiésel B10	68
Tabla 4.6	Resultados de las lecturas de emisiones contaminantes de las pruebas (combustible diésel y biodiésel B10)	85
Tabla 4.7	Comparativa de las eficiencias obtenidas	86
Tabla 4.8	Contraste de valores máximos obtenidos	87
Tabla 4.9	Datos de placa del motor Mercedes Benz de 1992	88
Tabla 4.10	Emisiones contaminantes emanadas por combustible	90

RESUMEN

En el siguiente estudio, se propone la elaboración de 20 litros de biodiésel a partir de aceite de soya virgen, por el método de transesterificación. Calculados los reactivos, se utilizan 18.4 kg de aceite vegetal y 0.184 kg de hidróxido de potasio (KOH) mezclados con 9.38 litros de alcohol metílico (metanol). Posteriormente, se verifican parámetros indispensables, bajo la norma ASTM D6751, para conocer si este biocombustible puede ser utilizado en motores de combustión interna, ya sea de uso directo o en mezclas con combustible diésel fósil.

Una vez verificados dichos parámetros, se realizan dos pruebas, la primer prueba se realiza con 100% combustible diésel PEMEX y tiene la finalidad de conocer la eficiencia del motor a utilizar, la cual fue del 17.0123%, así como cuantificar las emisiones que produce este combustible, por segundo, de: dióxido de carbono (3.3 %vol.), monóxido de carbono (0 %vol.), óxidos de nitrógeno (396.81 partes por millón) e hidrocarburos no quemados (0 partes por millón).

La segunda prueba se realiza con biodiésel B10, es decir, una mezcla que contiene 90% combustible diésel PEMEX y 10% biodiésel de soya. La eficiencia del motor, obtenida en esta segunda prueba, es de 15.9558% y en las emisiones, por segundo, se obtuvieron 3.33 %vol. para dióxido de carbono (CO₂), 0 %vol. para monóxido de carbono (CO), 396.81 partes por millón (PPM) para los óxidos nitrosos (NO_x) y finalmente 0 PPM para hidrocarburos no quemados (HC). Finalmente, se realiza un análisis y comparación entre los resultados de ambas pruebas, así como una comparación con resultados de otras investigaciones similares.

INTRODUCCIÓN

Durante las últimas décadas, la comunidad científica ha desarrollado diferentes alternativas energéticas, para depender cada vez menos de los combustibles a base de petróleo. Estas alternativas son las llamadas *energías renovables*, que prometen ser más limpias que las anteriores, reduciendo los gases de efecto invernadero (GEI), los cuales son los responsables del calentamiento global.

A raíz de la crisis del petróleo, en los años 70, creció el interés por desarrollar combustibles alternativos que pudiesen reemplazar a los fósiles. Es por ello que, en los últimos años, se ha visto un incremento tanto en la producción como la demanda de los llamados biocombustibles; especialmente del etanol y el biodiésel.

Uno de los beneficios que aporta el biodiésel, considerado como un combustible renovable, es la reducción de las emisiones de GEI y el material particulado provocado por la combustión. Sin embargo, su inconveniente radica en la competencia por la adquisición y uso de la materia prima, ya que el biodiésel se puede producir a base de semillas comestibles, no obstante, gran parte de ellas se destina a la alimentación humana, lo que provoca un alza en los precios de tal producto. El biodiésel también puede fabricarse a partir de aceite vegetal usado, denominado también aceite de fritura o aceite reciclado, sólo que éste ha sido acaparado, a lo largo de toda la República Mexicana, por grupos organizados en la compra y recolección. Debido a lo anterior, el biodiésel producido resulta más caro que el diésel convencional.

En el presente trabajo, se pretende verificar que, con el uso del biodiésel, las emisiones de GEI disminuyan; para ello, se producirá biodiésel por el método de transesterificación, a base de aceite de soya virgen; posteriormente, se usará en una mezcla con diésel a base de petróleo, se hará combustionar dicha mezcla en un motor que opera con ciclo diésel y, luego, se verificarán las emisiones.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

- Evaluar mediante un estudio ambiental y técnico del uso del biodiésel en motores la disminución de gases efecto invernadero elaborando el biocombustible a partir de aceite de soya virgen para beneficio de éstos, del medio ambiente y de la comunidad.

OBJETIVOS PARTICULARES

Los objetivos del presente trabajo son:

- Preparar el biodiésel a través del método de transesterificación evaluando y dando a conocer los parámetros indispensables para su uso en mezclas antes de ser utilizado en los motores de combustión interna con la finalidad de no dañarlos.
- Comparar las eficiencias del motor de ciclo diésel haciendo uso de 2 diferentes tipos de combustibles: diésel y biodiésel B10.
- Proyectar las emisiones de gases efecto invernadero de las diferentes pruebas utilizando un analizador de gases.
- Determinar mediante los cálculos correspondientes si el uso del biocombustible en mezclas está produciendo un cambio para bien de los motores que operan con ciclo diésel y de la población.

CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES

1.1 BIOCOMBUSTIBLES

Se entiende por biocombustible todo aquel combustible que se obtiene de biomasa. La biomasa se refiere a cualquier tipo de materia orgánica que haya tenido su origen inmediato en el proceso biológico de organismos vivos o sus desechos metabólicos (estiércol); es decir, el concepto comprende productos tanto de origen vegetal como de origen animal (Salinas y Gasca, 2009).

1.1.1 BIOCOMBUSTIBLES DE PRIMERA GENERACIÓN (1G)

Son aquellos que provienen de la biomasa, especialmente de cultivos agrícolas destinados a la alimentación humana (Cavieres, 2008). Algunos ejemplos son el jugo de caña de azúcar, los granos de maíz, el jugo de remolacha o betabel, el aceite de semilla de girasol, de soya, de palma, de ricino, de cacahuate, entre otros (Álvarez, 2009). Hay argumentos en contra de los biocombustibles 1G: según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (OAA, que, por sus siglas en inglés, es FAO, **Food and Agriculture Organization**), en el año 2007, la demanda de biocombustibles tuvo una influencia sustancial en el alza de los precios de alimentos. Estos combustibles se diferencian de los de segunda generación por el tipo de biomasa de donde se obtienen y por la tecnología que se utiliza para su procesamiento. En la actualidad, las tecnologías para la producción de biocombustibles de 1G son más simples y económicas (Cavieres, 2008).

1.1.2 BIOCOMBUSTIBLES DE SEGUNDA GENERACIÓN (2G)

Los biocombustibles de segunda generación (2G) se distinguen de los de primera generación por dos aspectos:

- a) Los insumos son residuos agrícolas y forestales compuestos principalmente por celulosa; por ejemplo, el bagazo de caña, el rastrojo de maíz (tallos, hojas y olote), la paja de trigo, el aserrín, hojas y ramas secas (Álvarez, 2009).
- b) Los procesos de producción son más avanzados y costosos, ya que su nivel de complejidad es más alto que el de primera generación (Salinas y Gasca, 2009).

Por lo tanto, la ventaja de los biocombustibles de segunda generación es que no compiten con los alimentos de consumo humano, pero su desventaja es que generan poca ganancia debido a sus procesos de producción, que, como ya se mencionó, son más avanzados y costosos respecto a los biocombustibles de primera generación.

1.1.3 BIOCOMBUSTIBLES DE TERCERA GENERACIÓN (3G)

La materia prima para los biocombustibles de tercera generación son los vegetales no alimenticios, de crecimiento rápido y con una alta densidad energética, por eso se les denomina “cultivos energéticos”. Entre estos vegetales están los pastos perennes, árboles, plantas de crecimiento rápido, algas verdes y verdeazules (Álvarez, 2009).

Diversos expertos señalan a las microalgas como los biocombustibles de 3G más característicos y prometedores. Con ellas se puede producir un aceite que, tras ser refinado, puede utilizarse como biodiésel, y si se les manipula de forma genética, se pueden elaborar todo tipo de combustibles. Su rendimiento es diez veces más alto que el de los biocombustibles de segunda generación: con el 0.42% de la superficie terrestre de EE. UU. se podría generar suficiente biocombustible para satisfacer todas las necesidades de dicho país (Fernández, 2014).

1.1.4 BIOCOMBUSTIBLES DE CUARTA GENERACIÓN (4G)

Estos biocombustibles son producidos a partir de bacterias modificadas genéticamente. Éstas utilizan dióxido de carbono (CO₂) para producir hidrógeno o alcoholes, como el butanol. Éste último, usualmente, es mezclado con gasolina y promete ser un mejor biocombustible que el etanol. La innovación en los biocombustibles 4G es que la bacteria actúa como una pequeña refinería que, como resultado, excreta los productos deseados, evitando los costosos procesos de fermentación y las transformaciones químicas. Esta generación aún se encuentra en desarrollo y presenta retos tecnológicos por resolver (Buitrón, 2014; Álvarez, 2009). En la Figura 1.1 se puede apreciar los principales países productores, de los 4 tipos de biocombustibles, en 2018.

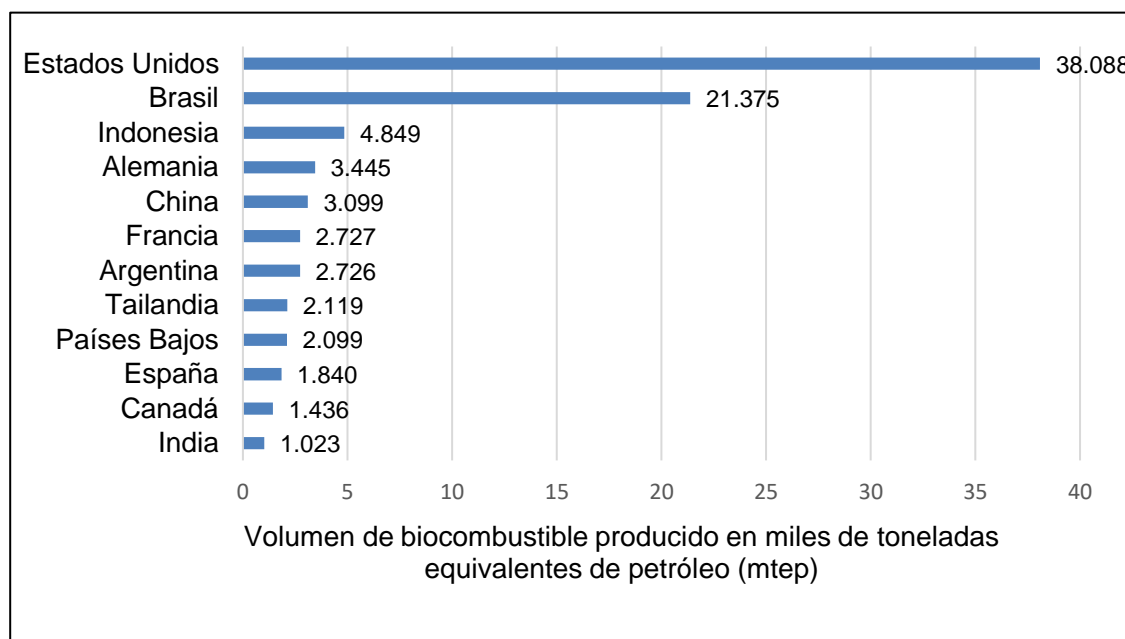


Figura 1.1 Ranking mundial de los principales países productores de biocombustibles (Fernández, 2020)

1.2 GENERALIDADES DEL BIODIÉSEL

El Departamento de Energía de los Estados Unidos (U.S. Department of Energy) define al biodiésel como un combustible renovable, producido a partir de aceites vegetales nuevos y usados, grasas animales y grasa de restaurante reciclada. De igual forma,

menciona que las propiedades físicas del biodiésel son similares a las del diésel derivado del petróleo y que es una alternativa renovable de combustión más limpia (Alleman y col., 2016).

El Consejo Europeo de Biodiésel (CEB, que por sus siglas en inglés es EBB, European Biodiesel Board) lo define como un combustible que está reemplazando al diésel y que se utiliza en motores cuyo principio de funcionamiento es el ciclo diésel. Se fabrica a partir de aceites vegetales, como el de canola, de semilla de girasol, de soya, y de aceites usados para freír o grasas animales (EBB, 2020). Existen varias definiciones de biodiésel, pero la más acertada y aceptada es la propuesta por la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (SAPM, que, por sus siglas en inglés, es ASTM, **American Society for Testing and Materials**), que lo refiere como un combustible compuesto de monoalquil ésteres de ácidos grasos de cadena larga, derivados de aceites vegetales o grasas animales, denominado B100, y que cumple con los requisitos de ASTM D6751.

Por otro lado, existen mezclas de biodiésel, ya que no todos los motores logran funcionar con 100% biodiésel (B100). Éstas se componen de un porcentaje de biodiésel y de diésel a base de petróleo. Al menos en Estados Unidos, todas las mezclas deben cumplir con la norma ASTM D6751. Las mezclas se denominan BXX, donde XX adquiere el valor del porcentaje presente, en volumen, de combustible de biodiésel. Por ejemplo, en una mezcla B20, se tiene el 20% en volumen de biodiésel, y un 80% de diésel a base de petróleo.

1.3 NORMA ASTM D6751

La especificación o norma ASTM D6751 se basa en una recopilación de investigaciones realizadas por fabricantes de motores, compañías, distribuidores y entidades relacionadas con el petróleo. Su objetivo principal es garantizar la calidad del biodiésel para mezclas al 20% (B20) y menores. Además, detalla las especificaciones que se deben tener al combinar biodiésel con los destilados medios del petróleo. Asimismo, describe las pruebas necesarias que se le deben realizar al biodiésel antes de ser mezclado para su venta. Entre ellas se establece que el producto se someterá a un

análisis químico para determinar el punto de inflamación, metanol, agua y sedimentos, viscosidad cinemática, cenizas sulfatadas, estabilidad a la oxidación, azufre, corrosión de la tira de cobre, índice de cetano, punto de enturbiamiento, índice de acidez, residuo de carbono, glicerina total y libre, fósforo, la temperatura atmosférica equivalente, el calcio y el magnesio combinados, y el sodio y el magnesio combinados (ASTM D6751-20, 2020).

Por lo tanto, las normas ASTM proporcionan un nivel mínimo de calidad para el biodiésel, independientemente de la fuente del combustible. Existen normas equivalentes a la ASTM D6751 en la Unión Europea y Canadá, las cuales son; la norma EN 14214 y CAN/CGSB-3.524, respectivamente. El biodiésel se puede hacer de casi cualquier materia prima que contenga ácidos grasos libres adecuados. Los aceites vegetales son las principales fuentes para la producción de biodiésel en los EE. UU. Sin embargo, también se utilizan las grasas animales residuales de las plantas de procesamiento, el aceite de cocina usado/reciclado y la grasa amarilla de los restaurantes (EIA, 2020).

1.4 BIODIÉSEL EN EL MUNDO

El uso de aceites vegetales como combustible data del año 1900, cuando Rudolph Diesel los empleó en su motor de combustión interna, pero fue hasta 1970 cuando el biodiésel se comenzó a producir significativamente debido a la crisis de petróleo. En 1985 se realizaron las primeras pruebas técnicas con biodiésel en Alemania y Austria. En este último se construyó la primera planta piloto productora de biodiésel a partir de las semillas de canola. Ambos países, junto con Canadá, Estados Unidos, Francia y Suecia, lideran la producción, el ensayo y uso de biodiésel en automóviles (Collymore y col., 2008).

El biodiésel comenzó a elaborarse a escala industrial en la Unión Europea (UE) a partir de 1992 (Sosa, 2018). Hoy, tan sólo en esa región, su producción utiliza alrededor de 3 millones de hectáreas de tierra cultivable. Las pruebas realizadas por los fabricantes de motores en la UE, en mezclas con diésel hasta el 5-10% o al 25-30% y 100% han dado

como resultado garantías para cada tipo de uso. De 1991 a 2005, la producción de biodiésel ha ido en aumento; en 1991 se contabilizaban 11 millones de litros a nivel mundial, cifra que aumentó considerablemente en el año 2005, cuando se produjeron 3 mil 662 millones de litros, aproximadamente. En 2006, aumentó casi 50%, al alcanzar los 6 mil millones de litros. La producción de biodiésel por países, de 2005 y 2006, se muestra en la Tabla 1.1 (Valderrama, 2007).

Tabla 1.1 Producción de biodiésel por países, en millones de litros (elaborado a partir de Valderrama, 2007)

País	2005	2006
Alemania	1,921	2,800
Francia	557	630
Estados Unidos	284	850
Italia	227	570
República Checa	136	150
Austria	85	0
España	84	140
Dinamarca	80	0
Polonia	80	130
Reino Unido	74	110
Brasil	70	70
Australia	57	0
Suecia	7	0
China	0	70
TOTAL	3,662	5,520

Desde el año 2000 hasta el 2004, la producción mundial de biodiésel se mantuvo estable, rondando entre 2 y 3 millones de toneladas anuales. De 2004 a 2008 se registró un alza significativa, alcanzando en 2008 los 11.1 millones de toneladas, registrándose una tasa anual de crecimiento del 37% para este período, como se muestra en la Figura 1.2 (IICA, 2010).

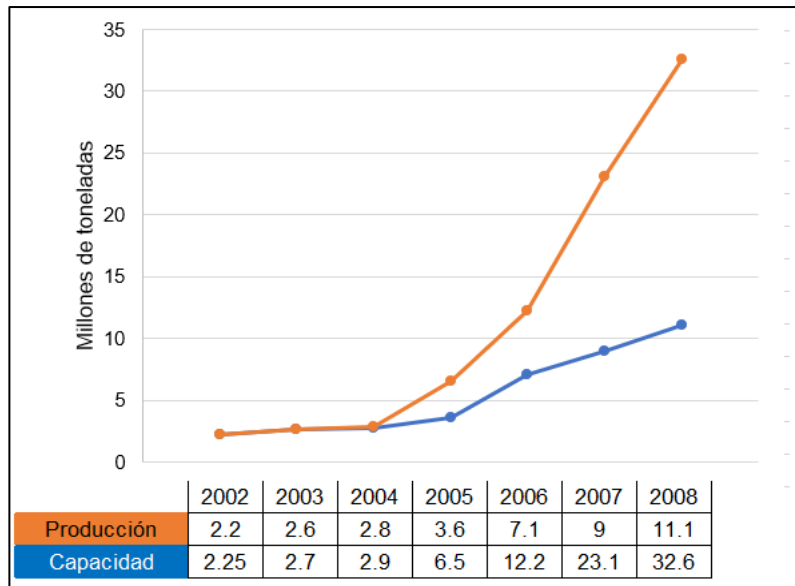


Figura 1.2 Capacidad y producción mundial de biodiésel, de 2002 a 2008 (IICA, 2010)

Para el año 2010, dos tercios del biodiésel producido a nivel mundial se concentraron en cinco países: Estados Unidos, con 14.3%; Argentina, con 13.1%; Alemania, con 12.6%; Francia, con 12%; y Brasil, con el 9.7%. El otro tercio restante lo completan Tailandia, Malasia y Colombia (Dufey y Strange, 2011). En 2019, ya había más países produciendo biodiésel. Los líderes en ese año se muestran en la Figura 1.3.

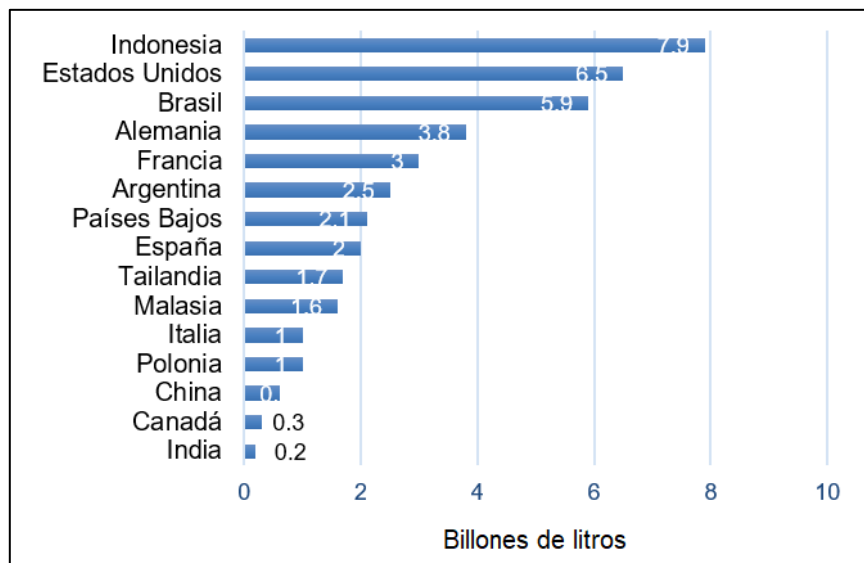


Figura 1.3 Ranking mundial de los principales países productores de biodiésel en 2019 (Tiseo, 2020)

La tasa de variación interanual en este periodo fue de -6% y 21%, con una clara tendencia al alza de producción, alcanzando los 50 millones de metros cúbicos en 2019 (Figura 1.4). Los principales productores de biodiésel en el mundo son Indonesia (16%), Estados Unidos (13%), Brasil (11%), Alemania (8%) y Francia (5%). El restante de la producción (47%) se distribuye entre Argentina, España, Países Bajos, Tailandia y Malasia (IICA y Torroba, 2020).

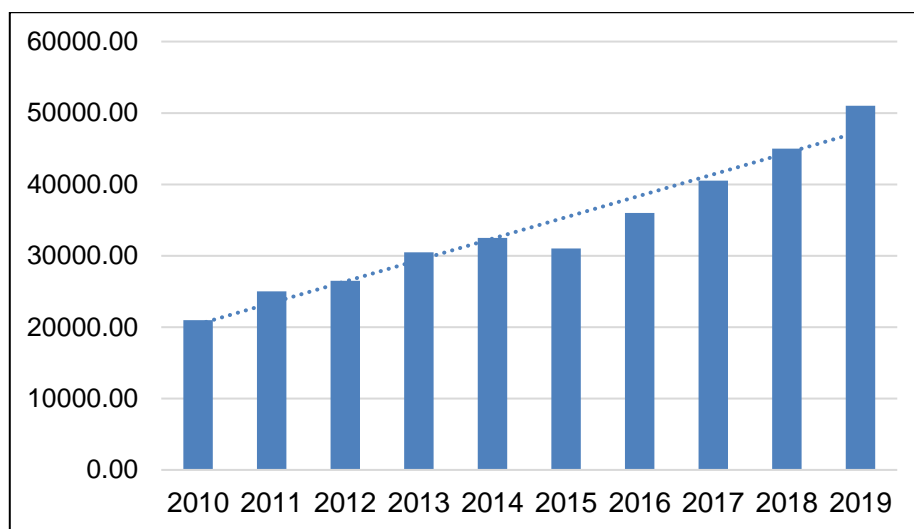


Figura 1.4 Tendencia y producción total, en miles de m³, de biodiésel en el mundo (elaborado a partir de IICA y Torroba, 2020)

Para producción de biodiésel, en 2019, las materias primas fueron los aceites vegetales: de palma (29%), soya (25%), canola (17%) y el resto (29%) corresponde a otras materias primas, como aceites usados, grasas animales y aceites vírgenes. La producción de biodiésel consume el 26% de la producción mundial de aceite de canola, el 18% de aceite de soya y el 16% de aceite de palma (IICA y Torroba, 2020).

1.4.1 UNIÓN EUROPEA

A principios del siglo XXI, la producción de biodiésel en la Unión Europea provenía principalmente del aceite de canola (50%), del aceite de soya (40%) y, en menor medida, del aceite de palma aceitera. Debido a la fuerte competencia por el uso del aceite de canola para fines energéticos y el sector de alimentos, se produjo un aumento significativo en su precio, por lo que comenzó a ser reemplazado por el aceite de soya, de girasol y de palma (Dufey y Strange, 2011).

Por otro lado, algunos estados miembros de la UE motivan la distribución y consumo de biocombustibles a través de incentivos a los usuarios. Por ejemplo, cuotas reducidas por registro vehicular y créditos para vehículos de combustible flexible. Los agricultores son apoyados con subsidios en fertilizantes, insumos, agua y transporte. A partir del 2020 se suprimieron los subsidios para producir biocombustibles de cultivos alimenticios. Además, han considerado limitar al 5% los biocombustibles generados de cultivos y obligar a producir otro 5% de forma celulósica.

En 2019, el consumo a nivel mundial de biodiésel llegó a ser de 48 millones de metros cúbicos, de los cuales, Francia y Alemania, miembros de la unión europea, tuvieron un consumo del 8% y 5%, respectivamente. En lo que respecta a las exportaciones de biodiésel, la Unión Europea concentra el 26% de ellas a nivel mundial, es decir, exportó cerca de 2.47 millones de metros cúbicos en 2019 y en cuanto a importaciones concentra el 45%, siendo una importadora de mucha relevancia (IICA y Torroba, 2020).

1.4.2 ESTADOS UNIDOS

Es uno de los primeros países productores de biodiésel en el mundo. De 2004 a 2007, su producción creció a una tasa media de cambio de 162.1%. Su producción llegó, en el 2007, a 1,700 millones de litros y para 2019 su producción se registró en los 6,500 millones de litros. Estados Unidos consume internamente toda su producción. Para agosto de 2007, existían 750 estaciones donde se vendía biodiésel. Carolina del Norte, Carolina del Sur, Texas y Missouri son los cuatro estados con mayor número de dichos establecimientos (IICA, 2010).

En 2019 Estados Unidos consumió el 14% del biodiésel producido a nivel mundial, es decir, 6,720 millones de litros. Estados Unidos no solo consume todo el biodiésel que produce, sino que debe importar para satisfacer su consumo. En este mismo año, importó cerca de 16% del total del biodiésel producido a nivel mundial (IICA, 2010; IICA y Torroba, 2020).

La política de biocombustibles en Estados Unidos incluye una combinación de incentivos, mandatos, cláusulas y mecanismos de implementación. De 1978 a 2004, el gobierno daba créditos fiscales por la cantidad de biocombustible mezclado con gasolina o diésel. En 2005 se vendieron 283 millones de litros de biodiésel, frente a 94.5 millones del año anterior. Muchas entidades estadounidenses, con un parque automovilístico importante, como la Administración de Correos, las fuerzas armadas, los sistemas de transporte metropolitano y los distritos escolares, utilizan actualmente biodiésel (Naciones Unidas, 2006).

Hoy en día, el principal mecanismo de promoción son los mandatos, tanto directos como indirectos, por lo que, para 2019 fue obligatorio el uso de biodiésel en diésel fósil de mínimo 4% en este país (IICA y Torroba, 2020; Meyers y col., 2010). La producción de biodiésel en los Estados Unidos proviene principalmente del aceite de soya. En la Figura 1.5 se especifica el insumo de materia prima necesaria.

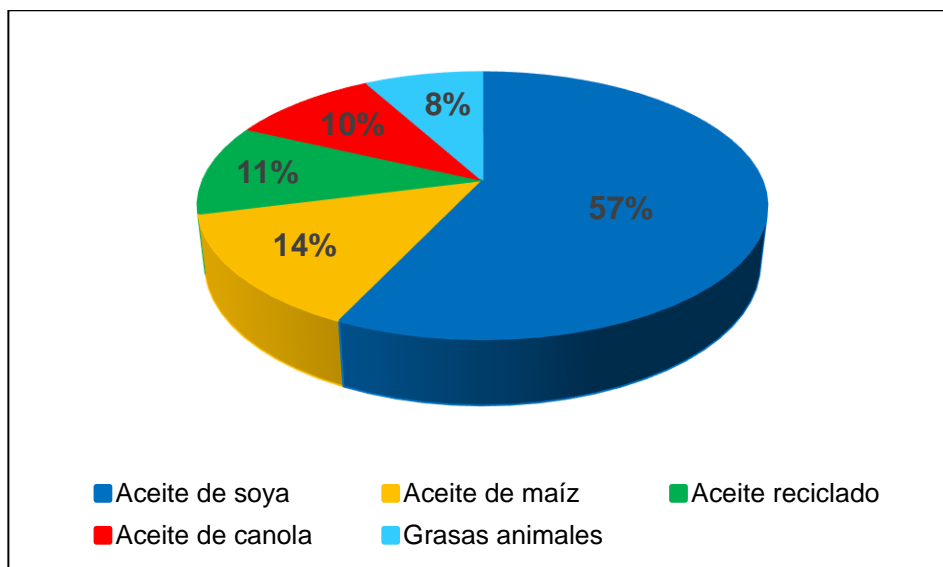


Figura 1.5 Materia prima para la producción de biodiésel en Estados Unidos (elaborado a partir de EIA, 2020)

1.4.3 AMÉRICA LATINA

1.4.3.1 ARGENTINA

Es un país productor y exportador de biodiésel, y su consumo es prácticamente nulo. Sus primeras exportaciones se efectuaron durante el 2007, con casi 320 mil toneladas

por un monto de 268 millones de dólares, cuyos principales destinos fueron Estados Unidos y la UE (principalmente Alemania y Países Bajos). Argentina presenta amplias condiciones agroecológicas para el cultivo de oleaginosas, es el exportador número uno a nivel mundial de biodiésel, con presencia en el mercado internacional, y su industria aceitera es de las más eficientes del mundo (Dufey y Strange, 2011; IICA, 2010). En la Figura 1.6 se muestra, tanto la producción de biodiésel que ha tenido Argentina en los últimos años, así como la demanda esperada para el año 2023.

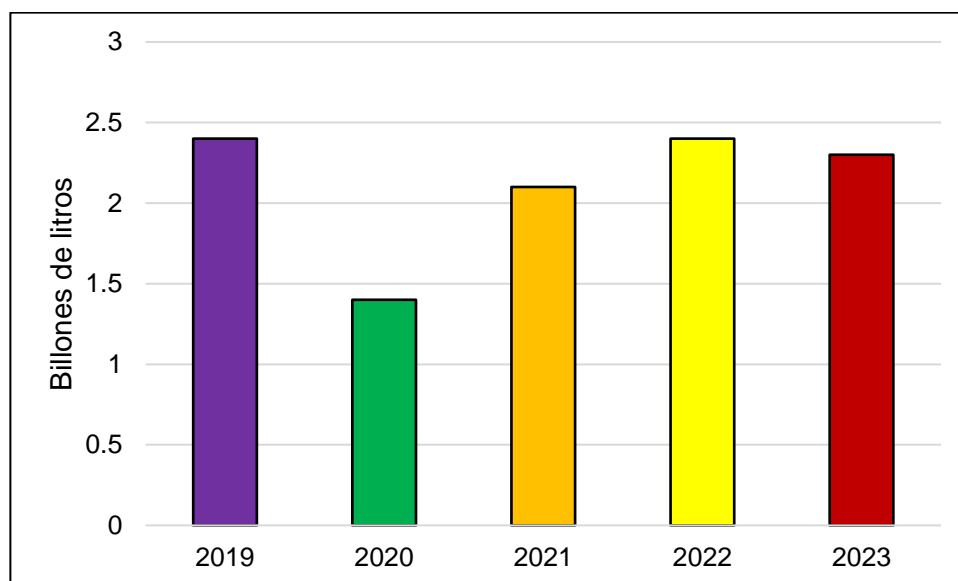


Figura 1.6 Producción de biodiésel en Argentina, de 2019 a 2023 (IEA, 2020)

Argentina produce biodiésel principalmente de aceite de soya y se encuentra en los primeros lugares de los países con mandatos obligatorios de uso mínimo del 10% de éste en mezclas. En 2019, Argentina produjo cerca del 9.4% del biodiésel total a nivel mundial y consumió cerca del 8%. En cuanto a exportaciones, Argentina comercializó cerca de 1,140 millones de litros en este mismo año, es decir, un poco más de mil millones de toneladas de este biocombustible, es decir, para 2019, Argentina exportó 3,186 veces lo exportado en 2007 (IICA y Torroba, 2020).

1.4.3.2 BRASIL

Desde 2005, año en el que el Gobierno Federal lanzó el Programa Nacional de Producción y Uso de Biodiésel, la producción de dicho combustible, se disparó y creció

hasta llegar a más de 400 millones de litros en el 2007, mientras que en el 2008 se produjeron mil 164 millones de litros. La capacidad de la producción nominal de este país excede los 3 mil 700 millones de litros anuales (IICA, 2010). En la Figura 1.7 se muestra la producción de biodiésel que ha tenido esta nación en los últimos años, de igual manera, se puede apreciar la demanda proyectada para el año 2023.

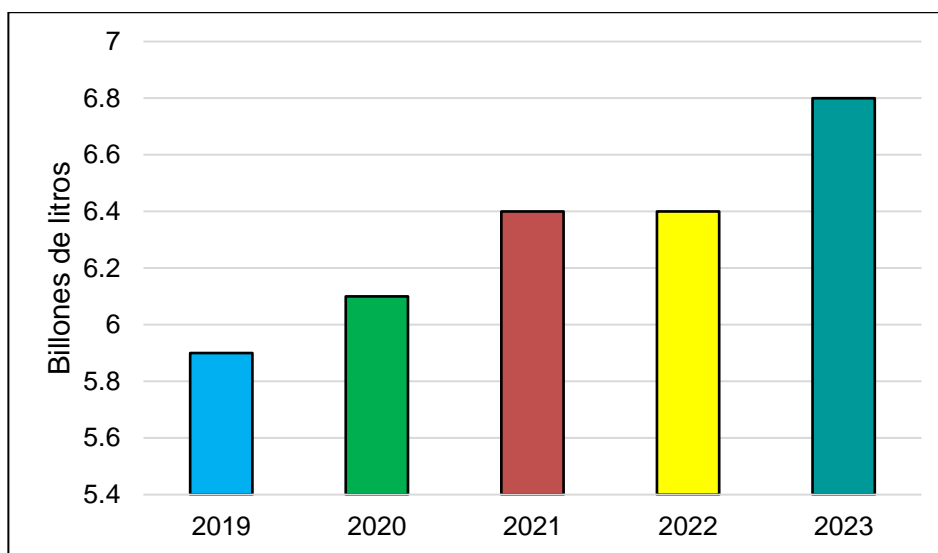


Figura 1.7 Producción de biodiésel en Brasil, de 2019 a 2023 (IEA, 2020)

En 2002, Brasil aprobó una ley que autoriza la adición voluntaria de un 2% de biodiésel al diésel de petróleo. A partir de 2008, la mezcla sería obligatoria, y en 2013, el porcentaje de biodiésel aumentaría a 5%. El biodiésel producido en Brasil proviene principalmente del aceite de soya, aunque, tanto los aceites usados como las grasas animales, cuentan con una fuerte participación en la producción de este biocombustible (IICA y Torroba, 2020; Naciones Unidas, 2006).

Brasil se ha convertido en uno de los 5 principales productores de biocombustibles líquidos, produciendo en 2019, cerca de 37.49 mil millones de metros cúbicos. De los cuales 5.9 mil millones son de biodiésel, es decir, Brasil produjo el 11.8% del total de biodiésel a nivel mundial y por otro lado, consumió cerca del 12%. Con un mandato obligatorio del 11% de uso de biodiésel, implementado en septiembre de 2019, Brasil

ocupa el 2do lugar dentro de 43 países, contabilizados en 2019, con mecanismos de este tipo (IICA y Torroba, 2020).

1.4.3.3 COLOMBIA

En Colombia se aprobó, en 2004, la Ley N.º 939, que autoriza la mezcla de biodiésel con diésel de petróleo. También contempla exenciones fiscales de diez años para la producción de algunas materias primas, incluida la de aceite de palma, así como para el biodiésel utilizado en los motores diésel de producción nacional. Asimismo, compromete al Ministerio de Agricultura a alentar el cultivo de semillas oleaginosas como materia prima para la producción de biodiésel (Naciones Unidas, 2006). En la Figura 1.8 se proyecta la evolución, tanto de la capacidad, como de la producción, que ha tenido esta nación en 10 años.

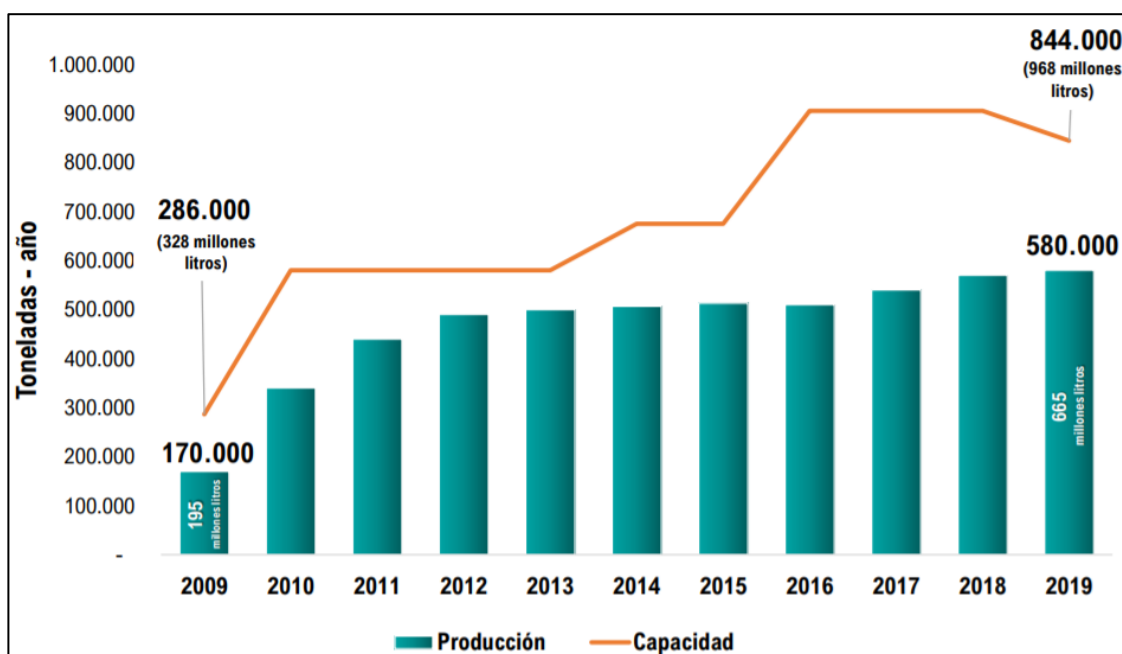


Figura 1.8 Evolución de la capacidad instalada y de la producción de biodiésel en Colombia de 2009 a 2019 (Fedebiocombustibles, 2020)

En Colombia, la principal fuente de aceite es la palma aceitera, pero, además de ésta, existen ocho cultivos que pueden proveer aceite para la fabricación de biodiésel: coco, higuera, aguacate, jatropha, canola, maní, girasol y soya. Por su parte, el Ministerio de Minas y Energía de Colombia proyectó la demanda de biodiésel de 2008 a 2020,

mediante la cual se deriva la solicitud de materias primas para atender la demanda interna en función de las metas propuestas de mezcla. En 2019, este país formó parte de los primeros lugares a nivel mundial, en utilizar mecanismos de “mandatos de mezcla obligatorio”, con una mezcla obligatoria del 10%, al igual que Argentina (IICA, 2010; IICA y Torroba, 2020).

1.4.3.4 PERÚ

No se reportan cifras significativas de producción de biodiésel en el país, aunque algunas empresas productoras de aceite de palma han instalado algunas plantas piloto para elaborarlo. Pese a que, en la actualidad, la principal fuente de aceite vegetal en Perú es la palma africana, en menor medida, la soya, existen otros cultivos que se están explorando como materia prima potencial de aceite para biodiésel. En 2019, se registró una importación a este país del 2% del biodiésel producido a nivel mundial, es decir, 0.19 millones de metros cúbicos (IICA, 2010; IICA y Torroba, 2020).

1.4.3.5 GUATEMALA

Todavía no cuenta con una producción comercial de biodiésel, pero tiene un alto potencial para hacerlo mediante cultivo de jatropha y palma africana (Dufey y Strange, 2011). Ambas reúnen condiciones ideales para su cultivo en Guatemala y el resto de Centroamérica (Naciones Unidas, 2006). Se puede concluir que, para los países de climas templados, la materia prima para la producción de biodiésel proviene del aceite de canola y de soya, mientras que, para los países subtropicales y tropicales, procede del aceite de palma africana y otras oleaginosas (IICA, 2010).

El aceite vegetal se mantiene como la fuente preferida para la elaboración de biodiésel. Se prevé que la producción mundial llegará a alcanzar los 39 mil millones de litros hacia 2024 y 40.5 mil millones de litros para 2026, lo que equivale a un aumento del 12% con respecto al nivel producido de 2016 (36.16 mil millones de litros). Se espera que Argentina e Indonesia continuarán dominando las exportaciones, con Estados Unidos y la Unión Europea como únicos importadores significativos. De igual manera, se estima que la Unión Europea permanezca como el productor más importante de biodiésel, por un gran margen (OCDE/FAO, 2017).

1.5 BIODIÉSEL EN MÉXICO

A principios de los años 2000, la Secretaría de Energía (SENER) evaluó la posibilidad de desarrollar un programa de fomento al uso de biocombustibles como fuente de energía renovable, de manera que se contribuyera a la diversificación del abasto de energéticos y a la reducción del consumo de carburantes fósiles, responsables de la generación de emisiones de gases con efecto invernadero (IICA, 2010).

En 2003 fue diseñada la Prospectiva del Uso de la Bioenergía en México, destacando cuatro ideas principales:

- Se podría utilizar la infraestructura que PEMEX emplea para producir diésel.
- Los motores a diésel requerirían ajustes menores para utilizar biodiésel puro (B100).
- Se ha incrementado el cultivo de plantas productoras de aceite en climas tropicales y templados.
- Existen incentivos fiscales y subsidios para fomentar el biodiésel.

En 2007 se completó un primer estudio sobre las posibilidades del etanol y el biodiésel como combustibles para el transporte en México. Dicho estudio fue coordinado por la SENER y patrocinado por el Banco Interamericano de Desarrollo (Proyecto ME-T1007 – ATN/DO-9375-ME) y la GTZ (Cooperación Técnica Alemana) por encargo del Ministerio de Cooperación Económica y Desarrollo (ECOFYS, 2016).

El primero de febrero de 2008 se publicó, en el Diario Oficial de la Federación (DOF), la Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos (LPDB), que tiene la finalidad de coadyuvar a la diversificación energética y el desarrollo sustentable.

El 18 de junio de 2009 se publicó, en el DOF, el Reglamento de la LPDB, que encomienda a la Comisión Intersecretarial para el Desarrollo de los Bioenergéticos establecer, revisar y evaluar una estrategia para desarrollar el mercado de insumos y promover la seguridad energética, la seguridad y soberanía alimentarias y la sustentabilidad ambiental (ECOFYS, 2016).

En 2013, la Secretaría de Energía elaboró el IICA Mexicano de Biomasa, donde se presenta información sobre los potenciales de producción de los distintos tipos de biomasa que podrían utilizarse con fines energéticos (ECOFYS, 2016).

En 2008, México contaba con más de 600 mil hectáreas cultivadas con oleaginosas, entre las que se incluyen: coco, soya, cártamo, algodón, cacahuate, ajonjolí y palma aceitera, aunque estaban dirigidos principalmente a la obtención de aceite comestible. Dichos cultivos alcanzaban una superficie total de 563.2 mil de hectáreas, lo cual representa un 2.6% de la superficie total de cultivos registrados en México (IICA, 2010). En la Tabla 1.2, se muestra la producción, de 2016, de seis cultivos oleaginosos.

Tabla 1.2 Producción de cultivos oleaginosos en México en 2016 (SAGARPA, 2017b)

Cultivo	Producción (miles de toneladas)	Participación
Soya	509.11	63.72%
Cártamo	121.77	15.24%
Cacahuate	96.00	12.01%
Ajonjolí	59.00	7.38%
Girasol	8.97	1.13%
Canola	4.07	0.52%
TOTAL	798.92	100%

Se han identificado tres plantas de producción de biodiésel que llegaron a operar comercialmente, pero que ya cesaron sus funciones:

1. En Cadereyta Jiménez, Nuevo León, una planta establecida en 2005, por Grupo Energéticos, con participación del Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey (ITESM), utilizaba grasas animales (sebo de res y grasa de pollo) y aceites vegetales de desecho. Su capacidad instalada era de 18 mil m³ por año. Dejó de operar en 2011 (ECOFYS, 2016).

2. En Lázaro Cárdenas, Michoacán, se instaló una planta anexa a una fábrica de aceite vegetal, con capacidad de 9 mil m³ por año. Fue inaugurada en 2007 y debía utilizar

Jatropha curcas e higuera; por falta de producción de esos cultivos, cerró en 2008 (ECOFYS, 2016).

3. En Chiapas, en 2010, el Instituto de Bioenergéticos de Chiapas instaló una planta de 10 mil m³ por año. Utilizaría *Jatropha curcas*, pero no hubo producción de semillas. Cerró operaciones en 2011 (ECOFYS, 2016).

La Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) ha impulsado, de 2013 a 2017, 960 proyectos para la producción de biocombustibles en México como una alternativa sustentable, mediante cultivos específicos, en beneficio del sector energético y de los productores del país (SAGARPA, 2017a). Además, se han instalado seis plantas de biodiésel en los estados de Puebla, Baja California, Durango, Estado de México y Oaxaca, las cuales cuentan con una capacidad de 4 millones 182 mil litros al año. En estas plantas, mostradas en la Tabla 1.3, la SAGARPA canalizó recursos por 25.1 millones de pesos de 2013 a 2017.

Tabla 1.3 Plantas comerciales de biodiésel en México (elaboración a partir de ECOFYS, 2016)

Nuevas plantas con apoyo de SAGARPA				Capacidad	Apoyo	Aporte	Total	Insumo	Inversión total
Programa	Año	Estado	Beneficiario	m ³ por año	MDP	MDP	MDP		\$/m ³
Bioeconomía	2010	Puebla	GRIMA biodiésel	90	1.8	4.2	6	Aceite usado	66,667
PEF	2011	Puebla	PROBIORAM	950	2.8	6.6	9.4	Grasa animal	9,895
PEF	2014	BC	ENRIMEX	74	10.5	10.7	21.2	Higuera	286,486
PEF	2015	Durango	Coop. Agr. Luz Michell	1,440	1.5	1.9	3.4	Grasa animal	2,361
PEF	2015	EDOMEX	BIORECEN	628	7.7	3.1	10.8	Grasa animal	17,197
PEF	2015	Oaxaca	RICINOMEX	1,000	0.8	0.8	1.6	Higuera	1,600
TOTAL				4,182	25.1	27.3	52.4		

PEF → Presupuesto de Egresos de la Federación

MDP → Millones de Pesos

BC → Baja California

El costo estimado del litro de biodiésel hecho con aceites usados va de 11.10 a 13.72 pesos, mientras que el producido con grasas animales va de 14.22 a 18.22 pesos (ECOFYS, 2016).

Es importante que el biodiésel producido, ya sea en una planta o laboratorio, cumpla con los estándares de calidad requeridos. En México, las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) son regulaciones que definen las características de procesos o servicios, que buscan, principalmente, salvaguardar la salud humana (SS, 2015). La NOM-016-CRE-2016 (2016), establece las especificaciones de calidad de los combustibles y biocombustibles que se fabrican o se importan al país. Para obtener una buena calidad del biodiésel se deben controlar diferentes propiedades y parámetros estipulados en dichas normas nacionales e internacionales, asegurando que los resultados estén en los rangos permitidos (ASTM D6751-20, 2020; CAN/CGSB-3.522, 2020; UE, 2019). Lo que se persigue es que tenga las mismas características del diésel pero que sea biodegradable, apegado a dichas normas. Así, el biodiésel promete reducir las emisiones contaminantes, sin importar si se usa en mezclas con diésel o de forma directa. En México, también existen normativas que determinan la cantidad, calidad y, en su caso, opacidad de los gases y partículas contaminantes que se pueden emitir a la atmósfera dentro del territorio nacional. Lo que se busca con el uso del biodiésel es reducir las emisiones contaminantes de todo tipo de vehículos, que utilicen diésel como combustible en el país. Asimismo, existe una normativa que establece las características del equipo y el procedimiento adecuado para verificar y analizar las muestras de gases y emisiones contaminantes de los vehículos al medio ambiente. El objetivo de lo anterior es que dicha normatividad sirva de referencia para la producción y uso del biodiésel en México (NOM-041-SEMARNAT, 2015; NOM-047-SEMARNAT, 2014; NOM-044-SEMARNAT, 2006; NOM-042-SEMARNAT, 2003; NOM-045-SEMARNAT, 1996).

1.6 OBTENCIÓN DEL BIODIÉSEL

Es importante recalcar que tanto el aceite vegetal limpio o virgen, así como el usado no son clasificados como biodiésel; debe existir un proceso que los modifique. Son pocos los casos de personas que han usado estos aceites directamente en los tanques de los vehículos, teniendo éxito. Sin embargo, el problema surge por la alta viscosidad y baja volatilidad de estos aceites sin procesar (Van Gerpen, 2019).

Actualmente, el biodiésel se produce a partir de cuatro principales métodos: pirólisis, microemulsión, transesterificación y esterificación.

a) Pirólisis

Es la degradación de la biomasa mediante energía en forma de calor. La pirólisis realizada con fines de investigación se realiza en atmósferas inertes (con ausencia de oxígeno) con presencia de gases, como helio, argón o nitrógeno (Gómez y col., 2008). Para producir el biodiésel por medio de pirólisis, se realiza un craqueo térmico del aceite vegetal, donde el calentamiento deben efectuarse a altas velocidades y a temperaturas entre 250 y 350 °C. Con esto, las cadenas largas de carbono del aceite vegetal se reducen a mezclas de fragmentos de varios tamaños, por lo que disminuye su viscosidad (Ali y Hanna, 1994).

b) Microemulsión

Las microemulsiones se definen como un sistema de agua, aceite y un compuesto anfifílico (moléculas que poseen un extremo soluble en agua, mientras que el otro la repele), que se presenta como una solución líquida, isotrópica y estable termodinámicamente (Carlucci y col., 2004). En la producción de biodiésel, la microemulsión con alcoholes, como el metanol, tiene por objeto reducir la viscosidad de los aceites, no obstante, también disminuye la calidad de éstos; tanto que, al inyectarlo en el motor, da como resultado una combustión incompleta (Navarro, 2011).

c) Transesterificación

Los métodos antes mencionados no resultan viables para la producción de biodiésel, ya que generan un combustible bajo en calidad, de alta viscosidad o muy costoso. De esta manera, el proceso más empleado para la obtención de este biocombustible es la transesterificación.

La transesterificación es una reacción de equilibrio entre un alcohol (generalmente se usa metanol o etanol, aunque también puede emplearse propanol o butanol), un triglicérido (aceite vegetal o grasas animales) y un catalizador para acelerar la reacción (ácido, base o enzimas), todo esto, con el fin de obtener ésteres y glicerol. En la Figura

1.9 se puede apreciar la reacción química de la transesterificación (Castellar y col., 2014).

Para producir una reacción estequiométrica correcta, se requiere, al menos, de 3 moles de alcohol por uno de aceite vegetal, para obtener 3 moles de ésteres monoalquílicos (biodiésel) y un mol de glicerol (Ali y Hanna, 1994). Esta reacción se lleva a cabo paso a paso, donde, primeramente, los triglicéridos se convierten en diglicéridos; posteriormente, en monoglicéridos; y finalmente, en glicerol o glicerina (Castellar y col., 2014).

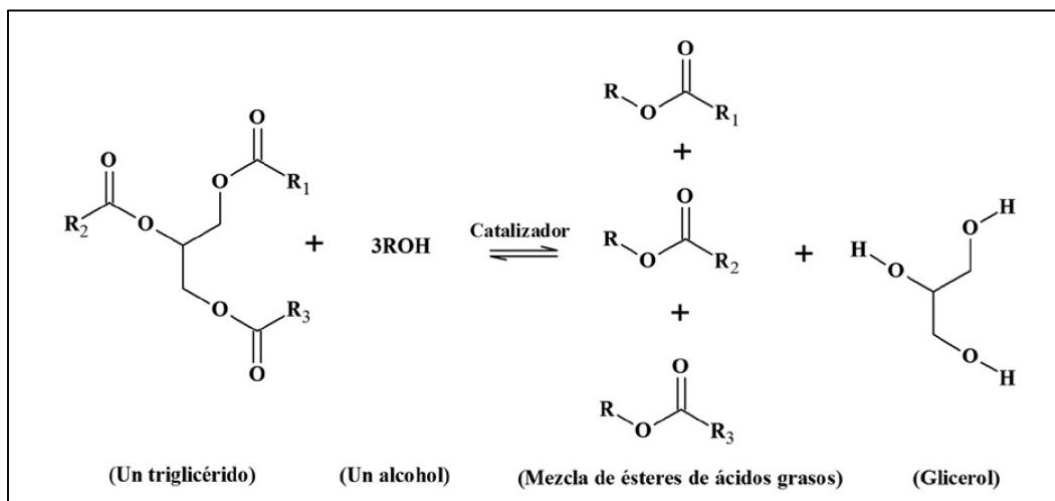


Figura 1.9 Reacción química de la transesterificación (Castellar y col., 2014).

Los investigadores señalan que las variables más importantes que influyen en el proceso de transesterificación son: la temperatura, el tipo de catalizador, la concentración de alcohol y la velocidad de agitación (Peterson y col., 1992).

d) Esterificación

Es la reacción de alcoholes con haluros de acilo o ácidos carboxílicos. El resultado de tal proceso es un éster más agua (Sandoval, 1984). El objetivo de la esterificación es reducir la acidez de la materia prima; con esto, se logra convertir a los ácidos grasos libres en biodiésel. La esterificación suele efectuarse con una sola reacción, pero si no se logra obtener la acidez deseada, se requerirá implementar una segunda reacción o, bien, las que sean necesarias hasta conseguirla (Pisarello).

1.7 USO DE BIODIÉSEL EN MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA

El uso de biodiésel en motores de combustión interna no es algo nuevo o reciente, la idea de utilizar aceite vegetal como combustible nace aproximadamente en 1895. En la Exposición Universal de París, de 1900, Rudolph Diesel presentó su motor diésel, el cual hizo funcionar con aceite de cacahuete (Ogunkunle y Ahmed, 2019). En 1911, Diesel declaró que su motor podía ser usado con aceite vegetal y ayudaría considerablemente en el desarrollo agrícola de los países que lo usarán (Perihan y Zeki, 2011).

La primera experiencia del empleo de un biocombustible en el transporte público data de 1938, cuando se utilizó biodiésel en la línea del ómnibus Bruselas-Lovaina durante la Segunda Guerra Mundial. Los alemanes lo utilizaron para mover sus flotas de guerra y los vehículos pesados en el norte de África. A fines de 1979, a raíz de la crisis del petróleo, se estableció una mezcla de gasolina/etanol y diésel/biodiésel; así, los biocombustibles se volvían a presentar como una alternativa al alza de los precios del petróleo y al posible agotamiento de los recursos no renovables (Salinas y Gasca, 2009).

Durante la década de los 90, se abrieron muchas plantas de biodiésel en países europeos; las compañías Renault, Peugeot y otros productores habían certificado sus motores para la utilización parcial con biodiésel. En el año 1998 se identificaban 21 naciones con proyectos comerciales de biodiésel (García, 2016). En 2004, la ciudad de Halifax en Nueva Escocia, revolucionó su red de transporte al permitir que los autobuses rápidos funcionaran totalmente con biodiésel hecho de aceite de pescado. Había pocos problemas mecánicos iniciales, que fueron superados oportunamente; poco después, toda la flota se había convertido en un éxito tras varios años de refinación (Ogunkunle y Ahmed, 2019).

En 2005, Chrysler introdujo, en el mercado de los Estados Unidos, los vehículos Jeep Liberty CRD, que podían funcionar con mezclas de biodiésel al 5%. Este fue un paso simbólico que llevó a la aceptación del uso de mezclas de biodiésel. La cobertura de la garantía se podía incrementar con el uso de 20% biodiésel (B20), con la condición de

que la calidad de los biocombustibles, en los Estados Unidos, mejorara (Ogunkunle y Ahmed, 2019). En septiembre de ese mismo año, Minnesota era el primer estado que obligaba un uso, al menos, del 2% de biodiésel (García, 2016).

Aunque los aceites vegetales son prometedores como combustibles alternativos, su uso sin tratamiento químico para reducir la viscosidad, en motores diésel, puede conducir a problemas con el inyector y el atasco del pistón. El biodiésel no contiene azufre, es un combustible alternativo, no tóxico, biodegradable y oxigenado con un número de cetano más alto y con mejor lubricidad, por lo que prolonga la vida útil del motor (Perihan y Zeki, 2011). En la Figura 1.10 se aprecia la tendencia mundial al alza de publicaciones sobre el uso de biodiésel en motores de combustión interna. Se puede notar que, con el paso de los años, hay más interés por el empleo de energías limpias y la búsqueda de fuentes de energéticas alternativas para sustituir a los combustibles fósiles y combatir el cambio climático.

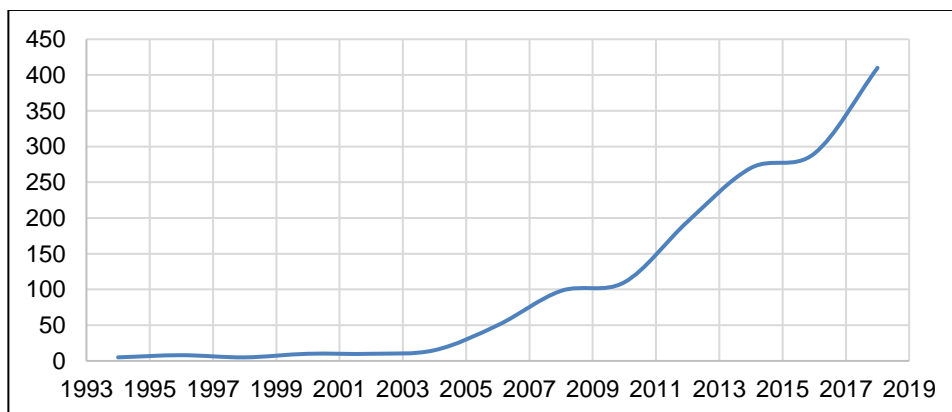


Figura 1.10 Tendencia mundial de publicación, por año, sobre la aplicación de biodiésel en motores diésel (Ogunkunle y Ahmed, 2019)

1.8 EMISIONES CONTAMINANTES DEL BIODIÉSEL

Los gases producto de la combustión por combustibles fósiles son actualmente uno de los principales problemas ambientales a nivel mundial, ya que el sector transporte es uno de los mayores responsables de tales daños, especialmente en las ciudades más pobladas (Llanes y col., 2017). En diferentes estudios se ha demostrado que el biodiésel puede ser un buen combustible, al ser mezclado en cualquier proporción con diésel

proveniente de combustibles fósiles (Mofijur y col., 2015). El biodiésel reduce sustancialmente la emisión de la mayoría de los gases y partículas contaminantes a la atmósfera. Puesto que es un combustible oxigenado, tiene una combustión más completa que la del diésel, mejorando la composición de las emisiones (Llanes y col., 2017).

Asimismo, reduce las emisiones de partículas sólidas menores a diez micrones (PM10), monóxido de carbono (CO) y óxidos de azufre (SOx), que se clasifican como peligrosos agentes contaminantes. La Agencia de Protección Ambiental (APA, que, por sus siglas en inglés, es EPA, **Environmental Protection Agency**), en un estudio compilatorio de diversas investigaciones, concluyó que las emisiones vehiculares de material particulado se reducían en un 47%, y de monóxido de carbono, en un 48%, con el uso de biodiésel (Sheehan y col., 1998).

Estudios realizados para el Laboratorio Nacional de Energías Renovables (LNER, que, por sus siglas en inglés, es NREL, **National Renewable Energy Laboratory**) de los Estados Unidos se demostraron que las emisiones de material particulado dependen del contenido de oxígeno del combustible (Graboski y col., 2003). Analizando las emisiones de biodiésel proveniente de diferentes materias primas, se halló que todas reducen la emisión de partículas en comparación con el diésel (Llanes y col., 2017).

Durante la combustión del biodiésel, se ven reducciones más significativas: 68% menos partículas PM10, 46% menos CO y 100% menos SOx, ya que el biodiésel no contiene azufre (Graboski y col., 2003). La EPA demostró que las emisiones de hidrocarburos (HC) durante la combustión disminuyen un 67%. Las emisiones del biodiésel también carecen de niveles de hidrocarburos policíclicos aromáticos, como el benceno (agentes cancerígenos), debido a que el biodiésel no contiene compuestos aromáticos de ningún tipo (Lin y col., 2006; Beer y col., 2002).

En cuanto a la toxicidad acuática, según el Instituto Nacional para la Seguridad y Salud Ocupacional (INSSO, que, por sus siglas en inglés, es NIOSH, **National Institute for Occupational Safety and Health**) de los Estados Unidos, ésta es muy baja. Se requieren concentraciones altísimas en el agua (mayores a 1,000 mg/L) para llegar a

niveles letales. Por ello, el biodiésel es bastante inofensivo para la fauna acuática, por lo que prácticamente no es tóxico en caso de ingestión por derrames (en peces o mamíferos). La concentración de biodiésel puede llegar a ser letal por ingestión oral si es muy elevada, alrededor de 17.4 g por kg de peso corporal, lo que significa que una persona de 80 kg tendría que tomar cerca de 1.6 litros de biodiésel para que tenga efectos mortales (Llanes y col., 2017).

Además, el biodiésel es altamente biodegradable en el agua. En estudios de la Universidad de Idaho se encontró que se degrada a un ritmo muy superior al del diésel convencional. En una prueba en solución acuosa, a los 28 días se había degradado el 95% del biodiésel, mientras que el diésel convencional lo hizo en un 40%. En una segunda prueba en ambientes acuáticos, el 87% del biodiésel se degradó en 28 días, mientras que la cantidad del diésel sólo fue del 26% (Llanes y col., 2017).

Las mezclas de biodiésel-diésel incrementan la biodegradabilidad del combustible. Así, el tiempo necesario para alcanzar un 50% de biodegradación se reduce de 28 a 22 días en el caso de mezclas B5, y de 28 a 16 días en el caso de mezclas B20 (Pasqualino y col., 2006). Lapinskiene y col. (2006), encontraron que el biodiésel es menos tóxico y más biodegradable que el diésel en el suelo. En un estudio realizado, hallaron que el diésel es tóxico a una concentración de 3% en peso en el suelo, mientras que el biodiésel no muestra toxicidad hasta concentraciones de 12% en peso. Observaron que el 80% del biodiésel fue completamente degradado, en tanto que el 61% del diésel lo fue, debido a la microbiota del suelo.

CAPÍTULO 2. FUNDAMENTOS

2.1 HISTORIA DE LOS MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA

El motor de combustión interna (MCI) se ve como una evolución de la máquina de vapor. La invención de los motores de combustión interna se debe a la colaboración de varios personajes que fusionaron sus ideas y perfeccionaron su desarrollo con el paso del tiempo.

En 1800, el francés Philippe Lebon diseñó y patentó un motor de gas, alimentado e inflamado por una máquina eléctrica. En él hizo arder cierta cantidad de gas combustible con una porción de aire (Agüero, 2013). Esta es la patente más antigua registrada para un motor de explosión, la cual no fue perfeccionada debido a su muerte (Martínez, 2007).

En 1816, el reverendo escocés Robert Stirling inventó un motor diseñado para sustituir a la máquina de vapor (Figura 2.1), pero su uso se limitó a aplicaciones domésticas (Espinosa, 2019).



Figura 2.1 Motor de Robert Stirling (Espinosa, 2019)

En 1820 el reverendo W. Cecil, inventor inglés, escribió un artículo llamado *“On the application of hydrogen gas to produce a moving power in machinery; with a description*

of an engine which is moved by pressure of the atmosphere upon a vacuum caused by explosions of hydrogen gas and atmospheric air.” (Aplicación de hidrógeno gaseoso para producir una fuerza motriz en maquinaria; con una descripción de un motor que se mueve por la presión de la atmósfera sobre un vacío causado por explosiones de gas hidrógeno y aire atmosférico). Posteriormente construyó un motor semejante al de Lebon (Figura 2.2), que funcionaba con una mezcla de combustible de hidrógeno y aire (Long, 2002).

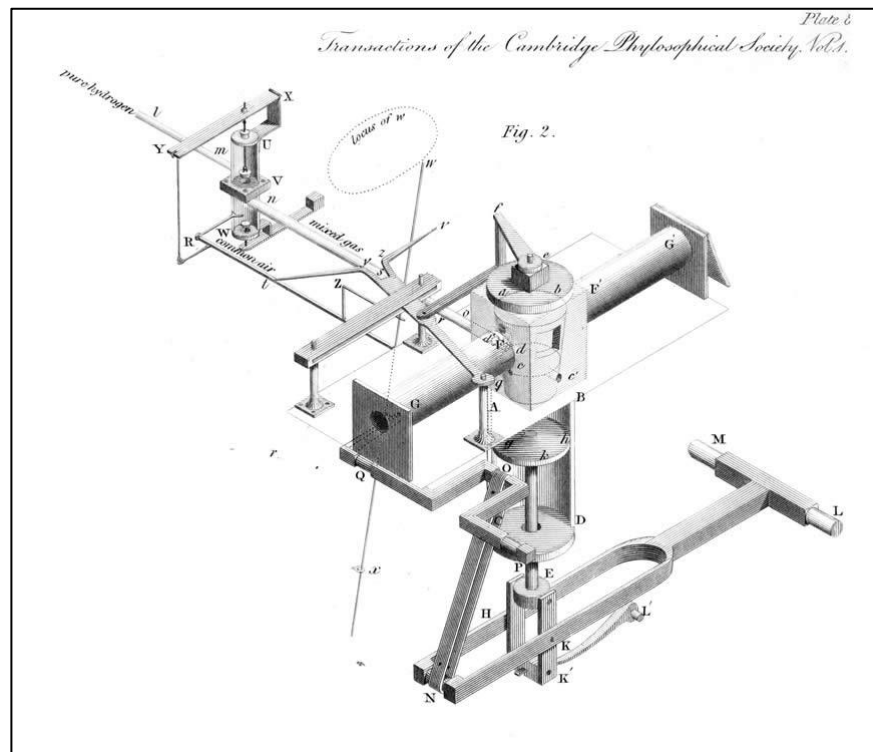


Figura 2.2 Motor del reverendo W. Cecil (Long, 2002)

Lebon y Cecil llegaron a la conclusión de que se podía producir movimiento al quemar ciertos combustibles en los cilindros de sus motores, pero éstos carecían de una etapa de compresión. Hacían falta más estudios de termodinámica para completar sus trabajos.

En 1824, el físico francés Nicolas Léonard Sadi Carnot publicó la teoría termodinámica de los motores térmicos: *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance* (Reflexiones sobre la potencia motriz del fuego y sobre las máquinas preparadas a desarrollar esta potencia), en la cual se reconocen los

trabajos y estudios previos realizados con los motores de combustión interna, por lo que él impone la necesidad de una etapa de compresión, para aumentar la potencia y eficiencia de los motores. En 1838, el inglés William Barnett desarrolló y amplió los experimentos de Lebon y Cecil, diseñando un motor que llevaría, por primera vez, una etapa de compresión con mezcla de combustible y aire e introducía una llama por la válvula de admisión, para encender la mezcla. Dicho motor se muestra en la Figura 2.3 (Espinosa, 2019).

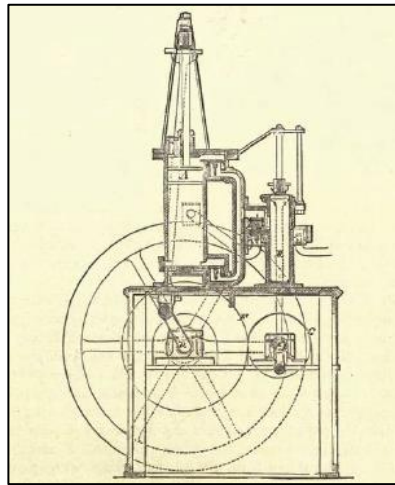


Figura 2.3 Motor de William Barnett (Espinosa, 2019)

En junio 1854, los inventores italianos Eugenio Barsanti y Felice Matteucci patentan su prototipo de motor a gas en el Reino Unido, reconociéndoseles actualmente como los pioneros de un motor de combustión interna eficiente, capaz de sustituir a la máquina de vapor (Espinosa, 2019).

En 1860, Jean Joseph Etienne Lenoir construyó un motor de dos tiempos con autoencendido; consumía gas de alquitrán con encendido por chispa eléctrica, y la eficiencia del motor era del 3%. Este se acopló, por primera vez, a un vagón de tres ruedas, alcanzando la pobre velocidad de 3 km por hora. Debido a su poca eficiencia y a que se podía ir más rápido caminando, se dejó de fabricar al poco tiempo (Agüero, 2013; Martínez, 2007).

Para 1862, Alphonse Beau de Rochas mejoró teóricamente la máquina de Lenoir, comprimiendo la mezcla aire/combustible antes de quemarla. Este sería el primer

modelo termodinámico completo de cuatro tiempos patentado que se conoce. Nunca se construyó un motor basado en este modelo (Figura 2.4), pero, para esa época, se reconoce al motor de combustión interna como una evolución de la máquina de vapor (Espinosa, 2019).

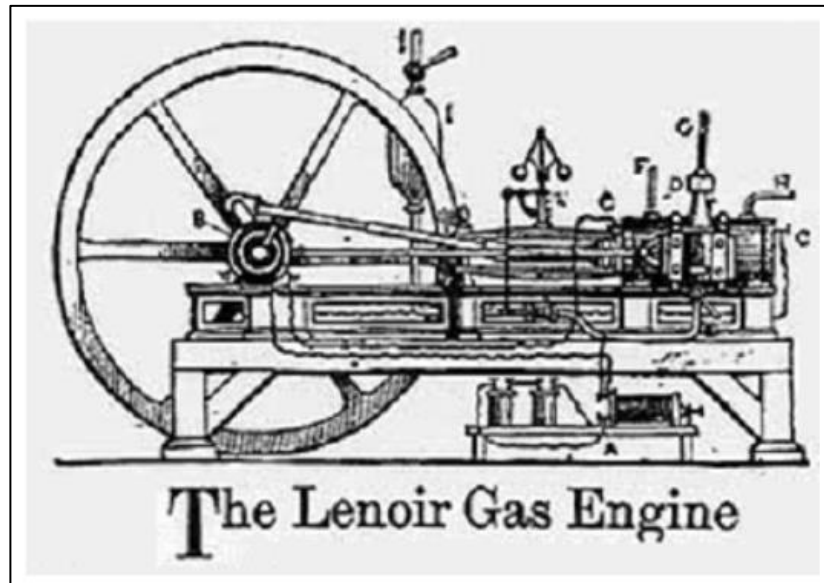


Figura 2.4 Máquina de gas de Lenoir (Espinosa, 2019)

Cabe mencionar que anteriormente, alrededor de 1860, Nikolaus August Otto dejó su trabajo como comerciante para dedicarse a la fabricación de motores (Martínez, 2007). En 1861, Otto construyó un motor junto con su hermano, que funcionaba sólo unos instantes antes de romperse; con esto, el hermano abandona el proyecto.

En 1864, Otto se asoció con el ingeniero Eugen Langen y juntos fundaron la que sería la primera empresa dedicada a la fabricación de motores de combustión interna. En ese mismo, año iniciaron la comercialización de motores atmosféricos de dos tiempos y pistón libre, que consumían la mitad de gas que el prototipo de Lenoir. Se dice que su motor alcanzaba las 180 revoluciones por minuto, por lo que se convirtió en un éxito (Espinosa, 2019).

Para 1875, las patentes de Alphonse Beau de Rochas pasaron a dominio público. Posteriormente, ante la necesidad de construir motores más pequeños y eficientes, en 1876, Otto, en asociación con Gottlieb Daimler y Wilhelm Maybach, logró construir el

primer motor de combustión interna de cuatro tiempos (Espinosa, 2019), el cual superó por mucho, la eficiencia de las máquinas de vapor, por lo que adquirió un lugar importante dentro de la industria (Martínez, 2007).

Otto fue el primero en explicar los fundamentos y el funcionamiento de las máquinas de cuatro tiempos; por ello, en la actualidad, los motores de encendido provocado (MEP) o de gasolina son también referidos como de ciclo Otto.

En 1880, Daimler quería centrarse en perfeccionar los motores existentes, sin embargo, ante la negativa de Otto, y a pesar de la influencia que Daimler tenía, Otto prescindió de su colega, provocando, posteriormente, la renuncia de Maybach (Espinosa, 2019).

Hacia finales de 1885, Daimler y Maybach habían desarrollado su primer motor, el cual, es considerado como el precursor de los motores modernos a gasolina. En 1889, fabricaron y patentaron un motor en "V", era suficientemente compacto y funcional comparado con otros motores de su época. Lo montaron en un carruaje de cuatro ruedas, presentando así su primer vehículo comercializado por Daimler-Maybach (Figura 2.5) (Espinosa, 2019; Agüero, 2013).



Figura 2.5 Vehículo Daimler-Maybach (Espinosa, 2019)

En 1885, el mecánico alemán Karl Benz patentó el Benz Patent-Motorwagen, considerado el primer automóvil de la historia (Figura 2.6), pues era un triciclo de chasis

tubular, propulsado por un motor en disposición horizontal monocilíndrico de 954 cm³ y una potencia declarada de 0.666 caballos de vapor (CV) a 250 RPM, desarrollado por él mismo (Martínez, 2007).



Figura 2.6 Benz Patent-Motorwagen (Espinosa, 2019)

Los motores de Daimler y de Benz llamaron la atención de dos ingenieros franceses: René Panhard y Emile Levassor, quienes compraron la patente de Daimler y empezaron sus primeros ensayos con vehículos entre 1890 y 1891. Una vez terminado su primer prototipo, realizaron un viaje redondo entre la Porte d'Ivry y el viaducto de Auteuil, en Francia, el cual fue un total éxito. Juntos comenzaron la industria del automóvil, con la primera empresa del mundo, llamada Panhard-Levassor. En la Figura 2.7 se muestra el primer vehículo comercializado por la empresa (Martínez, 2007).

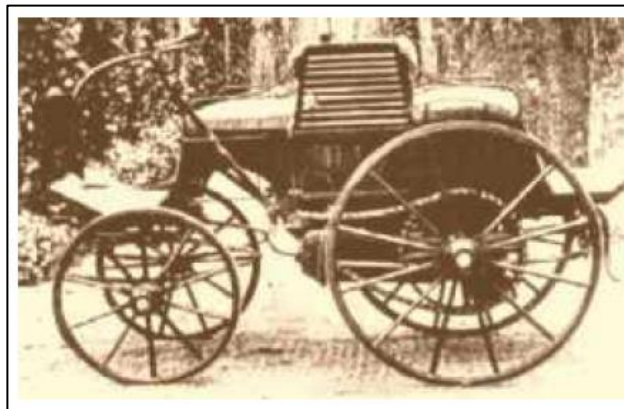


Figura 2.7 Primer vehículo comercializado por la empresa Panhard-Levassor, con motor a gasolina (Martínez, 2007)

De igual manera, para 1892, el ingeniero alemán Rudolph Christian Karl Diesel patentó la máquina térmica más eficiente hasta ahora: el motor Diésel. Se trata de un motor de autoignición, que funcionaba con aceite de palma y de cacahuate, y no necesitaba un sistema de encendido. Rudolph Diesel nació el 18 de marzo de 1858 en París, Francia. En 1870, fue enviado a Augsburgo, Alemania, donde continuó su formación académica y estudió ingeniería bajo la tutela de Carl von Linde. En 1890 se trasladó a Berlín, con la idea de diseñar un motor de combustión interna, capaz de superar al motor de Otto y acercarse lo más posible al rendimiento energético teórico ideal enunciado por Carnot (Espinosa, 2019; Martínez, 2007).

Un año después de patentar su motor, publicó la *Theorie und Konstruktion eines rationellen Wärmotors (Teoría y construcción de un motor térmico rotacional)*, una detallada descripción de éste. Entre 1893 y 1897, desarrolló sus motores diésel para la empresa MAN. Se dice que el primero que construyó explotó durante la primera prueba. Después de varios estudios y mejoras, pudo fabricar uno con una potencia de 25 CV y un rendimiento térmico del 10%. Al año siguiente, lo mejoró, alcanzando un rendimiento del 18%, donde superó, con creces, la eficiencia del motor de Otto; fue entonces cuando se implementaron sus motores en la industria (Martínez, 2007). En la Figura 2.8 se aprecia uno de los motores fabricados por Rudolph Diesel.



Figura 2.8 Motor de Rudolph Christian Karl Diesel (Espinosa, 2019)

2.2 ELEMENTOS QUE COMPONEN UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA

A pesar de que, en el motor a gasolina y el motor diésel, el principio de funcionamiento es diferente, ambos comparten algunos componentes internos, entre ellos, los elementos estáticos y los móviles, necesarios para su funcionamiento.

2.2.1 ELEMENTOS ESTÁTICOS

2.2.1.1 BLOQUE MOTOR

También llamado bloque de cilindros (Figura 2.9), es la base y centro de un motor de combustión interna. Los bloques vienen de diferentes formas y tamaños.

Está construido en una sola pieza, en hierro o aluminio, este último, más ligero y con mejores propiedades disipadoras de calor, pero de precio más elevado. Aloja en su interior a los cilindros, además de los soportes de apoyo del cigüeñal y los motores de refrigeración líquida. Los bloques motor más frecuentes tienen una serie de conductos por los que circula el agua o líquido refrigerante y el aceite que lubrica el motor. La función del bloque es alojar el tren alternativo, formado por el cigüeñal, las bielas y los pistones (Utrilla, 2020; Gualavisí, 2012). El bloque motor debe:

- a) Soportar la corrosión del líquido refrigerante.
- b) Ser lo suficientemente rígido para soportar los esfuerzos originados por la combustión.
- c) Disipar parte del calor generado por la combustión.



Figura 2.9 Bloque motor (CADECO, 2019)

2.2.1.2 CILINDROS

Mostrados en la Figura 2.10, los cilindros son las piezas por donde se hace circular a los pistones. Adquieren su nombre debido a la forma cilíndrica que tienen (Utrilla, 2020). El acabado que se les da es de sumo cuidado, ya que no deben tener una superficie “tipo espejo”. La máquina que se emplea para este trabajo deja un cierto “rayado” en el cilindro, útil para retener partículas de aceite necesarias para la lubricación. Cuando los cilindros son de gran tamaño, suelen fundirse en pares para una fabricación más sencilla; esto ocurre frecuentemente en los motores diésel. El material con el que se fabrican es acero (hierro y carbono, en una proporción de este último mayor a 1.8%) (Arias-Paz, 2004).



Figura 2.10 Cilindro de un motor (Gualavisí, 2012; Arias-Paz, 2004)

2.2.1.3 CÁRTER

Es un recipiente metálico que se ubica en la parte inferior del bloque (Figura 2.11), se fija al mismo con tornillos y, entre ellos, se interpone una junta o empaque, que garantiza su sellado. Su función principal es proteger, contra el agua y polvo, a los demás componentes del motor (Utrilla, 2020).

El cárter, a su vez, funciona como depósito de aceite y en él se aloja la bomba que se encarga de lubricar todo el motor; además, tiene un tapón para su vaciado (Arias-Paz,

2004). Lo convencional es fabricar el cárter de palastro estampado (hojas de acero), pero también pueden utilizarse aleaciones de aluminio, que aportan ventajas para disipar el calor (Utrilla, 2020).

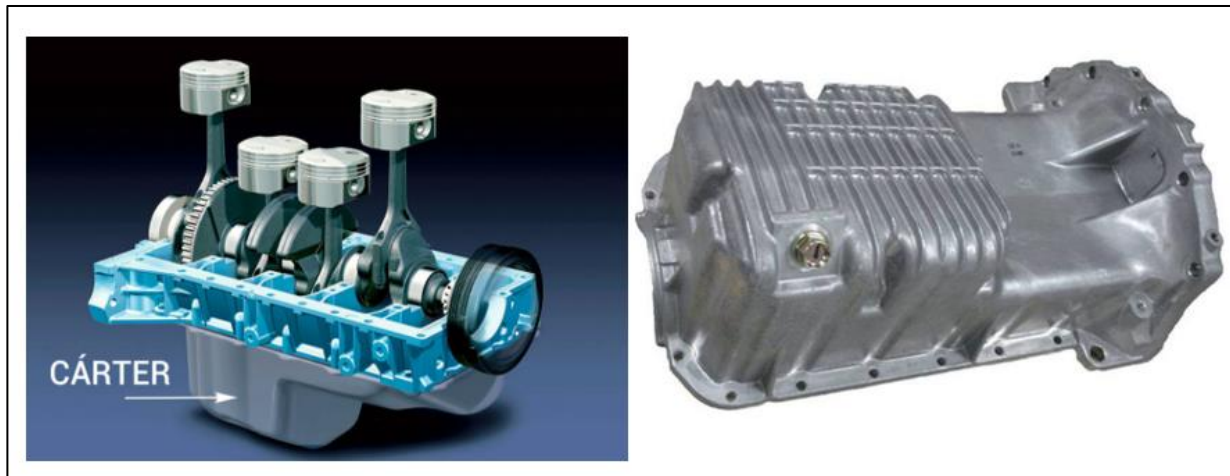


Figura 2.11 Cárter de un motor de combustión interna (Gualavisí, 2012; Utrilla, 2004)

2.2.1.4 CULATA

Es la parte superior del motor, también llamada tapa de cilindros (Figura 2.12). Tiene formas variadas según el diseño del motor, cubriendo un cilindro, un grupo de cilindros o todos los cilindros. Su función es soportar las explosiones que se generan en los cilindros, por ello, debe ir atornillada firmemente al bloque motor (Utrilla, 2020). Por lo tanto, es preciso que la culata resista a la presión de los gases, que tenga buena conductividad térmica, que soporte la corrosión, posea un coeficiente de dilatación térmica semejante a la del bloque, sólo por mencionar algunas características.

En general, la culata está construida con una doble pared, que permite circular el refrigerante. Cabe mencionar que, en los motores con refrigeración por aire, el sistema es diferente (Utrilla, 2020). Asimismo, en la tapa de cilindros se instalan las válvulas de admisión y escape, también los elementos de encendido (bujías, en un motor de gasolina) o de inyección (inyectores, motor diésel) (Arias-Paz, 2004). Entre el bloque motor y la culata se coloca una junta, que se denomina “junta de culata” (Figura 2.12), que garantiza un sellado entre ambas partes. La culata suele fabricarse en hierro fundido, aluminio o en una aleación ligera (Utrilla, 2020).



Figura 2.12 Culata o cabeza para motor 4 cilindros (Álvarez, 2019)

2.2.1.5 COLECTORES

Son los tubos por donde la culata recibe la mezcla de aire y combustible (colector de admisión) y por donde descarga los gases quemados efecto de la combustión (colector de escape).

El colector de admisión se fabrica usualmente por fundición en aluminio; se busca que sus interiores sean lisos para que los gases frescos no encuentren dificultad al ingresar al cilindro. De igual forma, se usan juntas entre las uniones del colector de admisión y la culata, siendo éstas hechas a base de amianto con chapa de acero. El colector de escape se fabrica en hierro fundido, ya que debe soportar las altas temperaturas de los gases que provienen de la combustión. La orientación de los conductos es importante para evitar bloqueos en la salida de los gases. Entre los colectores de escape y la culata se colocan, de igual manera, juntas que ayudan a sellar las uniones entre estos ambos componentes; éstas son fabricadas de amianto, aunque se está sustituyendo por compuestos poliméricos armados con chapas de acero (Arias-Paz, 2004).

2.2.2 ELEMENTOS MÓVILES

2.2.2.1 PISTÓN

Es una de las principales partes de un motor y su propósito es transferir la fuerza del gas en expansión dentro del cilindro al cigüeñal, a través de una biela (Plamenov, 2011).

En la figura 2.13 se aprecia un pistón con forma de vaso invertido; se le denomina cabeza o fondo a la parte superior, que recibe la presión originada por la explosión, y su forma depende de la cámara de combustión, de la relación volumétrica, del recorrido de las válvulas, entre otros. La falda es una pared delgada que sirve para guiar al pistón dentro del cilindro. De igual manera, el pistón lleva un orificio que lo atraviesa y sirve para colocar el pasador o bulón, que sujeta el pie de biela (Arias-Paz, 2004).

Para transmitir la energía del pistón al cigüeñal, el pistón está conectado a una biela, que, a su vez, está conectada al cigüeñal. Debido a que el movimiento lineal del pistón debe convertirse en un movimiento rotacional del cigüeñal, se experimenta una pérdida mecánica como consecuencia (Plamenov, 2011).

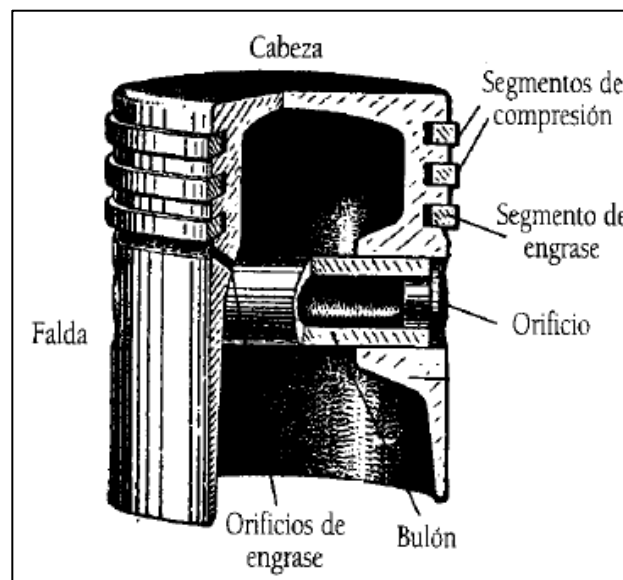


Figura 2.13 El pistón y sus partes (Arias-Paz, 2004)

Los pistones suelen fabricarse en una aleación de aluminio fundido, para una buena conductividad térmica. El aluminio se expande cuando se calienta, por lo que debe proporcionarse el espacio adecuado para mantener el libre movimiento entre el pistón y el cilindro. Una holgura deficiente puede hacer que el pistón se atasque en el cilindro, mientras que una excesiva provoca una pérdida de compresión y un aumento del ruido del pistón. Es por ello por lo que se deja un ligero huelgo entre el pistón y el cilindro y se recurre a colocar anillos o segmentos de compresión y engrase (Plamenov, 2011).

2.2.2.2 SEGMENTOS DEL PISTÓN

Son aros o anillos elásticos de fundición, que van ubicados en las hendiduras del pistón, por lo que su diámetro es algo mayor que el del pistón; deben comprimirse para ser montados en el pistón y, posteriormente, en el cilindro (Arias-Paz, 2004).

Las funciones principales de los anillos son transferir el calor del pistón hacia la pared del cilindro, devolver el aceite al cárter y proporcionar un sello entre el pistón y la pared del cilindro. Suelen estar hechos de hierro fundido, ya que éste conserva su forma original bajo el calor, la carga y otras fuerzas dinámicas. Los anillos de pistón que se utilizan comúnmente en motores pequeños incluyen dos de compresión y uno de aceite o engrase. Un anillo de compresión está ubicado en la ranura del pistón más cercana a la cabeza del mismo. Éste sella la cámara de combustión de cualquier fuga durante el proceso de combustión (Plamenov, 2011).

El segundo anillo de compresión posee una cara cónica, se ubica en la ranura media del pistón. Éste se utiliza para sellar aún más la cámara de combustión y para limpiar la pared del cilindro del exceso de aceite. Los gases de combustión, que no logran ser detenidos por el primer anillo de compresión, son interceptados por el segundo. Por su parte, el tercer anillo, el de aceite o engrase, se ubica en la ranura del pistón más cercana al cárter. Su función es limpiar el exceso de aceite de la pared del cilindro durante el movimiento del pistón. Tal exceso se devuelve a través de las aberturas de este anillo al cárter. Los motores de ciclo de dos tiempos no requieren anillos de aceite porque la lubricación se suministra mezclando aceite con la gasolina, por lo que no hacen uso de un depósito de aceite (Plamenov, 2011).

En la Figura 2.14 se representa la configuración más frecuente de los anillos o segmentos:

- 1) En la primera imagen se aprecian los dos anillos de compresión y uno de engrase por encima del bulón; esta configuración es la más frecuente.
- 2) En la segunda ilustración, el anillo de aceite o engrase se ubica en la falda del pistón; esta configuración se utiliza más en motores diésel.

3) En el tercer dibujo, se añade un segundo anillo de aceite o engrase en la parte superior del pistón.

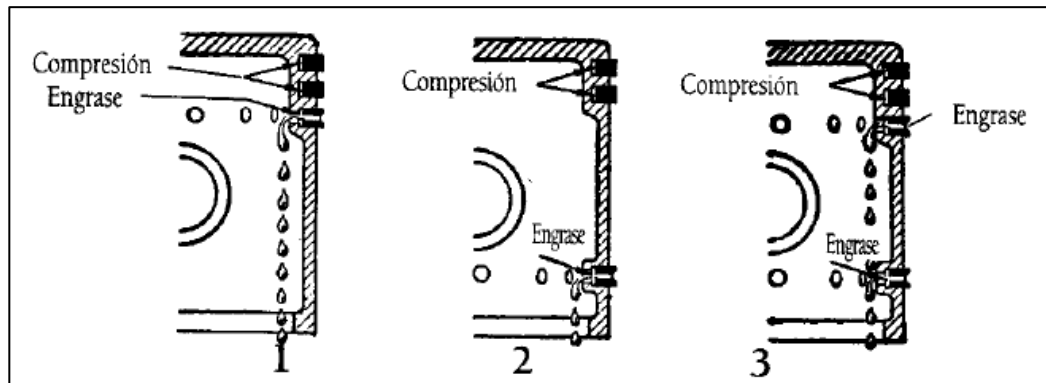


Figura 2.14 Esquema de las principales configuraciones de los segmentos de un pistón (Arias-Paz, 2004)

2.2.2.3 BIELA

La biela es un eslabón importante dentro de un motor de combustión interna. Es la encargada de conectar el pistón al cigüeñal y de transferir la presión que generan los gases en el pistón al cigüeñal y, posteriormente, enviarla a la transmisión (Plamenov, 2011).

Existen diferentes tipos de materiales y métodos de producción en la creación de bielas (Plamenov, 2011). Lo usual es fabricarlas en acero con níquel y cromo (Arias-Paz, 2004). Los procesos de elaboración más habituales son la fundición, la forja y la metalurgia en polvo (Plamenov, 2011).

En la Figura 2.15 se puede apreciar las partes de una biela: el pie, el cuerpo y la cabeza. Esta última consta de dos partes, que son la cabeza superior, que va fundida en el mismo cuerpo, y la cabeza inferior o sombrerete, que se encarga de sujetar a la parte superior con el cigüeñal por medio de pernos o tornillos. El cuerpo de la biela se fabrica con un perfil en forma de H, para asegurar su rigidez, ya que este componente está sometido a grandes esfuerzos. El pie abraza el bulón, con interposición de un casquillo, usualmente fabricado de bronce (Arias-Paz, 2004).

Para que el roce entre la cabeza de la biela y el codo del cigüeñal sea más suave, se interponen rodamientos o unos componentes denominados cojinetes o metales de biela. Estos metales “antifricción”, fabricados en plomo, estaño y antimonio, son un tipo de fusible mecánico (haciendo referencia a los fusibles eléctricos), que, cuando presentan problemas de engrase o lubricación, se funden antes de engarrotar a la biela con el cigüeñal, provocando daños irreversibles y más costos (Arias-Paz, 2004).

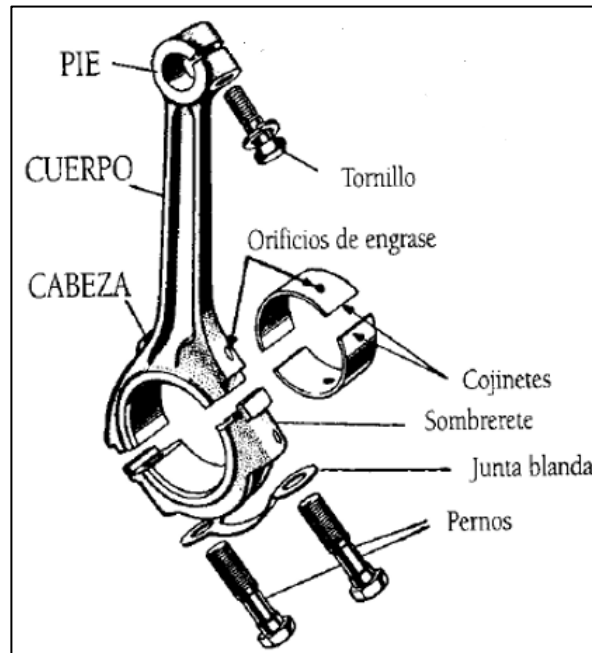


Figura 2.15 La biela y sus partes (Arias-Paz, 2004)

2.2.2.4 CIGÜEÑAL

El cigüeñal o árbol motor es la parte de un motor, que transforma el movimiento alternativo del pistón en movimiento rotacional. En un extremo del cigüeñal se coloca una polea dámper o antivibrador, para absorber las vibraciones del cigüeñal, mientras que, en el otro extremo, un volante motor, que acumula inercia y regula el giro del cigüeñal (Plamenov, 2011; Arias-Paz, 2004).

El cigüeñal resulta ser uno de los componentes que más “sufren” en los motores debido a los esfuerzos, roces y golpeteos del pistón (Arias-Paz, 2004). Está fabricado de hierro fundido muy pesado, en la mayoría de los casos, y de acero sólido, en motores de muy alto rendimiento. Los extremos del cigüeñal deben hacerse muy resistentes para

soportar el estrés de colocar el volante motor y el d mper, en el que, a su vez, se conectan otros componentes, como el generador, el aire acondicionado, la bomba de agua, etc. (Plamenov, 2011).

Los cigüeñales modernos llegan a tener velocidades de 6,500 a 7,000 revoluciones por minuto, es por ello por lo que, debido a su forma, es necesario dotarlos de contrapesos para equilibrarlos, con el propósito de no sufrir variaciones en su rápido giro, que podrían romperlo (Arias-Paz, 2004).

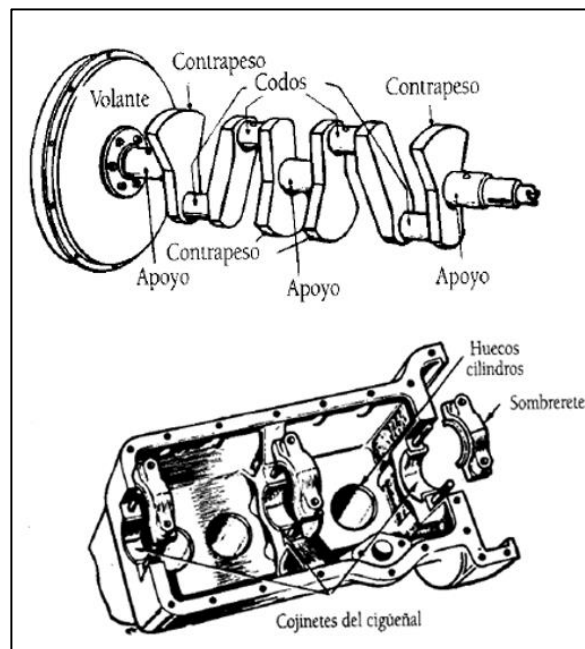


Figura 2.16 Cigüeñal y bloque de un motor de cuatro cilindros (Arias-Paz, 2004)

2.2.2.5 VOLANTE MOTOR

Mostrado en la Figura 2.17, el volante motor es una rueda pesada, provista de un aro dentado de acero, que se monta en el extremo del cigüeñal más próximo a la caja de cambios o velocidades. La función del aro dentado es engranar el pi n del motor eléctrico o marcha. Mencionado anteriormente, el movimiento del cigüeñal no es suave, ya que la energía suministrada por el pistón es discontinua y de naturaleza impulsiva. Para solucionar este problema, los fabricantes instalan estos volantes pesados, que suministran una inercia constante al cigüeñal (Plamenov, 2011; Arias-Paz, 2004).

El entrante del volante sirve de plato de apoyo para el embrague (*clutch*), cuya función es transmitir o no el movimiento del motor hacia la caja de cambios y, con ello, mover todo el vehículo a voluntad del conductor.

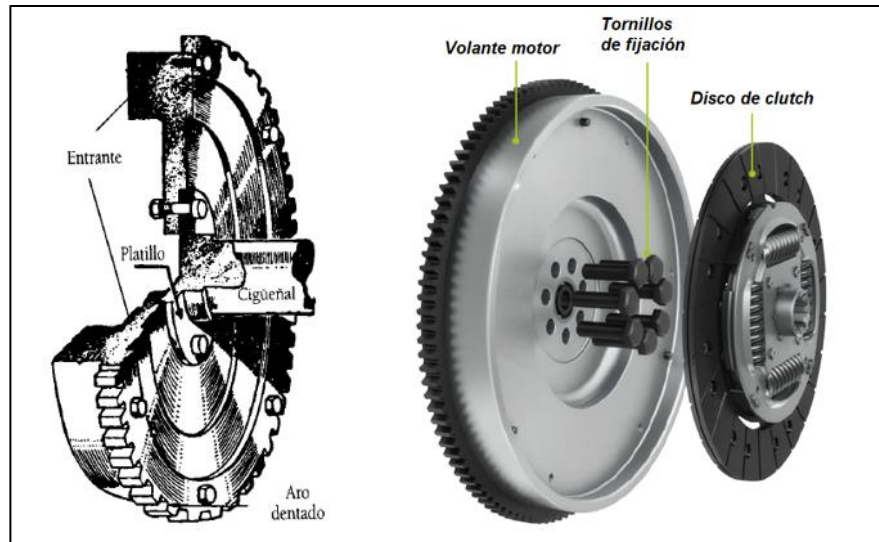


Figura 2.17 Volante motor (Valeo, 2016; Arias-Paz, 2004)

2.2.2.6 DÁMPER

Mencionado anteriormente, el volante motor va montado en un extremo del cigüeñal, mientras que en el otro se coloca el dämper, el cual absorbe las vibraciones de éste. Ambos extremos del cigüeñal tienden a torcerse elásticamente debido a las explosiones de los pistones más alejados del otro extremo. Esta torsión es casi siempre amortiguada por el volante motor, gracias a su grosor y resistencia.

A una determinada velocidad de giro, denominada velocidad crítica, las vibraciones adquieren gran amplitud y se hacen notar desagradables para los pasajeros, aunque no se produzca una ruptura en el cigüeñal. Para evitarlas, sobre todo en motores grandes o cigüeñales largos, es frecuente el uso del dämper, el cual se monta en el extremo opuesto al volante, quedando en ocasiones dentro o fuera del cárter (Arias-Paz, 2004).

2.3 CICLO DIÉSEL IDEAL (TEÓRICO)

El motor encendido por compresión (ECOM) fue propuesto, por primera vez, por Rudolph Diesel en 1890. En él, el aire al interior del cilindro se comprime hasta una

temperatura que es superior a la del autoencendido del combustible. La combustión inicia cuando el combustible se inyecta dentro del cilindro con ese aire caliente (Cengel y Boles, 2012). Por lo tanto, y a diferencia de los motores de encendido por chispa (ECH o motores de gasolina), el motor ECOM no necesita un carburador y bujías para realizar la combustión. Estos elementos se sustituyen por un inyector de combustible.

En la Figura 2.18 se presenta el diagrama de funcionamiento ideal de un motor diésel, considerando que el fluido que ingresa es aire puro y que se comporta como un gas perfecto. El análisis se hace sobre un motor de cuatro tiempos, el cual consta de cuatro procesos: dos isentrópicos, uno a presión constante y uno a volumen constante. Se necesitan dos vueltas completas del cigüeñal para realizar un ciclo completo (cuatro carreras).

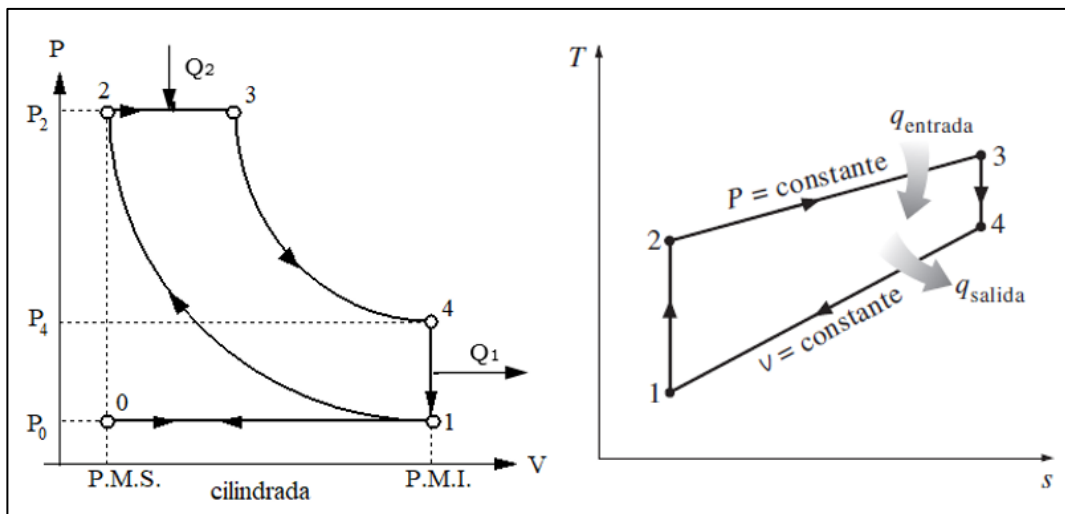


Figura 2.18 Diagrama presión (P)-volumen (V) y temperatura (T)-entropía (S) del ciclo diésel ideal (Draghi y Filgueira, 2015; Cengel y Boles, 2012)

El principio de funcionamiento de los motores diésel consiste en admitir la mayor cantidad de aire como sea posible, comprimirlo lo suficiente hasta generar una presión y temperatura tales que, al introducir combustible finamente pulverizado, se combusione rápidamente y, producto de dicho proceso, se genere trabajo mecánico (Draghi y Filgueira, 2015). Para ello, es necesario que ocurra una serie de transformaciones termodinámicas del fluido, explicadas a continuación:

1) ADMISIÓN ISOBÁRICA (PROCESO DE 0 A 1)

La primera carrera del pistón se da cuando éste desciende del punto muerto superior (PMS) al punto muerto inferior (PMI), con la válvula de admisión abierta, ingresando aire del exterior al cilindro y suponiendo que éste se llena. Dicho proceso se modela como una expansión de volumen a presión constante (isobárica), ya que, al estar abierta la válvula de admisión, la presión en el cilindro es igual que la atmosférica (Laplace, 2013).

2) COMPRESIÓN ISOENTRÓPICA (PROCESO DE 1 A 2)

Una vez que el pistón llega al PMI, se cierra la válvula de admisión y comienza el ascenso al PMS; en esta segunda carrera se da la compresión del aire de forma isoentrópica (la entropía permanece constante) y adiabática (no hay intercambio de calor con el medio externo debido a la velocidad del proceso). La presión aumenta de P_1 a P_2 , el volumen disminuye, debido a la compresión, de V_1 a V_2 y la temperatura aumenta de T_1 a T_2 (Mishra, 2017; Laplace, 2013). La temperatura alcanzada al finalizar la compresión supera los 600°C debido a que el volumen del aire que entra se reduce significativamente, alcanzándose la temperatura necesaria para producir la autoinflamación del combustible sin necesidad de una chispa eléctrica (Draghi y Filgueira, 2015).

3) ADICIÓN DE CALOR A VOLUMEN CONSTANTE (PROCESO DE 2 A 3)

Poco antes de que el pistón llegue a PMS y hasta un poco después de que empiece a bajar, el inyector introduce el combustible pulverizado en la cámara de combustión a muy alta presión (Draghi y Filgueira, 2015). En este paso, el combustible es el que adiciona el calor al sistema, y se modela a presión constante ($P_2=P_3$) (Laplace, 2013). Además, se experimenta un aumento en el volumen (V_2 a V_3), en la temperatura (T_2 a T_3) y en la entropía (S_2 a S_3).

4) EXPANSIÓN ISOENTRÓPICA (PROCESO DE 3 A 4)

La alta temperatura originada por la combustión conlleva a una expansión de los gases, mismos que empujan al pistón nuevamente hacia el punto PMI (tercera carrera). Es en este proceso donde se da la expansión del aire de forma isoentrópica y donde se obtiene

el trabajo del sistema (Mishra, 2017). Al igual que la compresión, se supone que la expansión se realiza sin intercambio de calor con el medio exterior por ser un proceso muy rápido, considerándose como un proceso adiabático. La presión interna desciende a medida que el cilindro aumenta de volumen (Draghi y Filgueira, 2015). Se puede apreciar en la Figura 2.18 cómo la presión cae, de P_3 a P_4 ; se origina un aumento de volumen, de V_3 a V_4 ; la temperatura cae, de T_3 a T_4 ; y la entropía permanece constante, S_3 igual a S_4 .

5) RECHAZO DE CALOR A VOLUMEN CONSTANTE (PROCESO DE 4 A 1 Y DE 1 A 0)

Es aquí donde el pistón descansa por un momento en el punto muerto inferior. Posteriormente, se abre la válvula de escape para liberar los gases quemados, producto de la combustión, y la presión en el cilindro baja hasta la presión atmosférica (4 a 1). Estos gases son empujados por el pistón, nuevamente de carrera ascendente hacia PMS (cuarta y última carrera, de 1 a 0), y salen del cilindro con una temperatura mayor que la inicial (Laplace, 2013). Este proceso se considera isócoro, ya que la transformación que experimentan los gases es a volumen constante. Al llegar al PMS, se supone que, de forma instantánea, se cierra la válvula de escape y se abre la de admisión, para iniciar un nuevo ciclo. Como, en teoría, no hay pérdida de carga debido al rozamiento de los gases quemados al circular por los conductos de escape, la transformación (1 a 0) puede considerarse como isobárica (Draghi y Filgueira, 2015).

2.3.1 RENDIMIENTO DEL CICLO DIÉSEL

La segunda ley de la termodinámica expresa que ninguna máquina térmica es capaz de convertir en trabajo mecánico todo el calor aportado. Por ello, sólo una parte de la energía química aportada por el combustible es transformada en trabajo y esta proporción representa el rendimiento térmico del motor (Draghi y Filgueira, 2015).

Bajo las suposiciones de aire frío estándar, la eficiencia del ciclo diésel se define como:

$$\eta_{\text{TerDiésel}} = \frac{W_{\text{neto}}}{q_{\text{ent}}} = 1 - \frac{q_{\text{sal}}}{q_{\text{ent}}} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{k(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_1 \left(\frac{T_4}{T_1} - 1 \right)}{kT_2 \left(\frac{T_3}{T_2} - 1 \right)} \quad (2-1)$$

En los motores diésel existe una relación, llamada relación de corte (r_c), la cual se da entre los volúmenes del cilindro antes y después de la combustión (en la Figura 2.18, el punto 3 y punto 2).

$$r_c = \frac{V_3}{V_2} \quad (2-2)$$

Usando la relación anterior y las del gas ideal isoentrópicas, para los procesos 1 a 2 y 3 a 4, se puede reescribir la eficiencia del ciclo diésel como:

$$\eta_{\text{TerDiésel}} = 1 - \frac{1}{r^{k-1}} \left[\frac{r_c^k - 1}{k(r_c - 1)} \right] \quad (2-3)$$

Donde:

r = la relación de compresión (el volumen máximo entre el volumen mínimo en el cilindro).

r_c = la relación de corte.

La eficiencia del ciclo Otto difiere de la del ciclo diésel por el término expresado entre corchetes (ecuación 2-3), el cual es siempre mayor a 1. Por lo tanto:

$$\eta_{\text{TerOtto}} > \eta_{\text{TerDiésel}}$$

Lo anterior se cumple si ambos ciclos operan con la misma relación de compresión. En los motores de gasolina, la mezcla de aire y combustible se comprime durante la carrera de compresión, lo que conlleva a que las relaciones de compresión estén limitadas por el comienzo del autoencendido del combustible. En los motores diésel, solamente el aire se comprime durante la carrera de compresión, eliminando la posibilidad de autoencendido del combustible. Al no tener el problema del autoencendido, conduce a que los combustibles menos refinados (por lo tanto, menos costosos) puedan utilizarse

en los motores diésel. De igual forma, los motores diésel están diseñados para operar a relaciones de compresión mucho más altas (usualmente entre 12 y 24) a diferencia de los motores de encendido por chispa (gasolina). De este modo, las eficiencias de los motores diésel son mayores que las de los motores a gasolina (Cengel y Boles, 2012).

Asimismo, cuando la relación de corte disminuye, la eficiencia del ciclo diésel aumenta. Los motores diésel también queman el combustible de manera más completa, ya que, usualmente, operan a menores revoluciones por minuto y la relación de masa de aire y combustible es mucho mayor que en los motores de encendido por chispa. Las eficiencias térmicas de los motores diésel varían entre 35 y 40% (Jaramillo, 2007).

2.3.2 DIFERENCIAS ENTRE EL CICLO DIÉSEL IDEAL Y EL REAL

El ciclo real es el que refleja las condiciones efectivas de funcionamiento de un motor y, cuando se representa en un diagrama P-V, se denomina diagrama indicado, ya que puede obtenerse con la utilización de un indicador. Este instrumento detecta las variaciones de presión y volumen en el interior del cilindro en cada momento del ciclo (Draghi y Filgueira, 2015). En la Figura 2.19 se puede apreciar la diferencia entre un diagrama real y un diagrama indicado de un ciclo diésel.

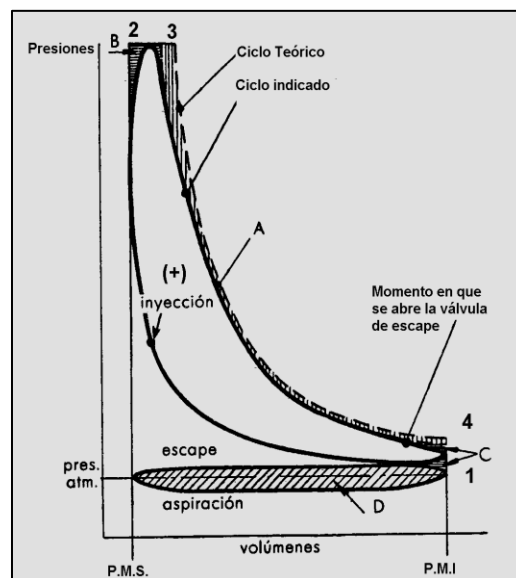


Figura 2.19 Diagrama presión - volumen ideal (teórico) y real (indicado) del ciclo diésel (Giacosa, 1968)

Las principales diferencias entre los ciclos real y teórico son:

a) Combustión a presión constante

Como se aprecia en la Figura 2.19, en el ciclo real, la combustión se realiza en tales condiciones que la presión varía durante el proceso, mientras que, en el ciclo teórico, se supondría constante. En el ciclo real, una parte de la combustión se lleva a cabo a volumen constante, y otra parte, a presión constante. Sólo en el caso de los motores muy lentos, se desarrolla de forma aproximada al proceso teórico (Planas, 2010).

b) Pérdidas de calor

En el ciclo ideal se asume que no hay pérdidas de calor del cilindro hacia afuera, pero, en realidad, las paredes externas del cilindro están refrigeradas para garantizar una temperatura adecuada de trabajo entre el cilindro y el pistón. Esto conduce a que las líneas de compresión y expansión no sean adiabáticas (Draghi y Filgueira, 2015).

c) Aumento en los calores específicos del fluido

Al inicio se explicó el principio de funcionamiento del ciclo diésel; se asumió que el aire que ingresaba al cilindro se comportaba como gas perfecto o gas ideal, es decir, que sus calores específicos, tanto a presión constante (C_p) y volumen constante (C_v), no cambian durante el proceso. En el ciclo real, lo anterior no sucede, ya que estos valores no permanecen constantes, sino que cambian con el aumento de la temperatura. Por lo tanto, los valores de presión y temperaturas alcanzados son menores que en el ciclo ideal.

d) Combustión

A diferencia del ciclo ideal, en el ciclo real, la combustión no se produce a presión constante ni es instantánea, sino que dura un cierto tiempo. Para compensar el tiempo de retardo, se adelanta la inyección de combustible con respecto al PMS (segunda carrera). Si la inyección tuviese lugar justamente en el PMS, la combustión y el pico de presión que genera el trabajo útil ocurrirían mientras el pistón ya recorrió gran parte de su carrera descendente, generando una gran pérdida de trabajo. Por ello, se anticipa la inyección cuando el pistón se encuentra en la proximidad del PMS, de modo que la combustión sea más completa, expresada ésta por el

redondeo entre el punto 2 y 3 (suministro de calor) de la Figura 2.19. Aunque existe una pérdida de trabajo útil a consecuencia de lo anterior, ésta resulta bastante menor a la que se tendría si la entrada de combustible se hiciera exactamente al finalizar la carrera de ascenso del pistón, como ocurre en el ciclo teórico (Draghi y Filgueira, 2015).

e) Tiempo de apertura de la válvula de escape

En el ciclo teórico se hace la suposición de que la apertura y cierre de las válvulas ocurriría instantáneamente, sin embargo, en la realidad, eso no sucede, pues la válvula de escape se abre con anticipación para comenzar a expulsar los gases producto de la combustión y disminuir la presión en el interior del cilindro hasta aproximarse a la presión externa. Justo como el punto anterior, este adelanto en la apertura de la válvula de escape provoca una pérdida de trabajo útil, la cual sería mayor si no se anticipara (Draghi y Filgueira, 2015).

El período en el que las válvulas de admisión y escape están simultáneamente abiertas se denomina cruce de válvulas. Durante el mismo, se aprovecha la inercia creada por el aire en los colectores de admisión y escape para facilitar tanto la entrada del aire como el escape de los gases residuales, para un nuevo ciclo.

f) Pérdidas por bombeo

El ciclo ideal supone que tanto la admisión como el escape del aire se realizan a presión constante e igual a la atmosférica, sin rozamiento alguno. En realidad, el aire debe circular por los colectores de admisión y escape; debido a esto, el aire encuentra resistencias a su avance, provocadas por el rozamiento entre sus moléculas y las paredes de los colectores (Planas, 2010).

2.4 VENTAJAS Y DESVENTAJAS RELACIONADAS CON EL COMBUSTIBLE DIÉSEL

2.4.1 VENTAJAS

El diésel se considera un combustible más eficiente, es decir, tiene una mayor densidad de energía, propiciando que se requiera un menor volumen de combustible para realizar una cantidad específica de trabajo (Planas, 2018).

El uso del diésel es cada vez más frecuente en cualquier medio de transporte, pero es especialmente popular en vehículos grandes, como autobuses, camiones, aeronaves y barcos. Es un combustible aceitoso pesado, elaborado a base de petróleo e hidrocarburos, al igual que la gasolina sin plomo. El diésel suele mezclarse con aditivos que ayudan a mejorar las cualidades y prestaciones de los motores: cuanto más calidad tengan éstos, mejor rendimiento a nivel de potencia tendrán (RODES, 2017).

En algunos países existe preferencia por el diésel debido a que es más barato que las gasolinas. Además, en la actualidad es más amigable con el medio ambiente, ya que, por normativa, los nuevos vehículos que funcionen con este combustible deben reducir sus emisiones contaminantes.

El motor diésel sólo utiliza la compresión del aire para darle ignición, por lo que requiere menos componentes con procesos sencillos para encenderlo. Esto se traduce en una duración y larga vida para él, pues, además, por su naturaleza, es más robusto en sus piezas. Los motores a gasolina generalmente son más veloces, pero los motores diésel están diseñados para cargar mucho peso y desplazarse sin mayor esfuerzo, por lo que siempre serán superiores en fuerza, es decir, torque (Quiyono, 2020).

El combustible diésel tiene mejores propiedades de lubricación que la gasolina. De hecho, una de las tareas secundarias del diésel es lubricar el inyector, la parte superior de los cilindros y anillos del pistón, áreas donde más se necesita, para resistir las altas temperaturas originadas por la fricción, la compresión y combustión.

Algo importante por mencionar es que el diésel no libera una gran cantidad de vapor inflamable, que podría provocar una explosión, a diferencia de las gasolinas. La baja presión de vapor del diésel es especialmente ventajosa en aplicaciones marinas, donde la acumulación de mezclas explosivas de combustible y aire es un peligro particular. Por la misma razón, estos motores son inmunes al bloqueo por vapor (Planas, 2018).

2.4.2 DESVENTAJAS

Una de las principales desventajas del diésel, como ya se sabe, es que se trata de un combustible no renovable y tóxico. Algunos estudios médicos revelan que la exposición

a sus emisiones afecta principalmente al sistema respiratorio, agravando el asma, alergias, bronquitis y la función pulmonar.

Entre las emisiones características de la combustión del diésel se encuentran: hidrocarburos (HC), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x), dióxido de azufre (SO₂), entre otros. Algunos de estos compuestos salen a la atmósfera de forma gaseosa, y otros, en forma de partículas (Cervantes, 2020).

Las emisiones particuladas son generalmente metales, carbono y compuestos orgánicos, como hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) (Kuusimaki y col., 2003). Las partículas se clasifican en finas (2.5 a 0.1 micrómetros) y ultrafinas (menores a 0.1 micrómetros) (D'Amato y col., 2002), y en primarias y secundarias. Las primarias son aquellas formadas por la combustión, y las secundarias surgen a consecuencia de interacciones de agregación y condensación en el sistema de escape (Flores, 2013).

El mantenimiento y reparación de las máquinas diésel es más costoso porque sus componentes son más escasos y los técnicos o mecánicos deben ser especializados, a diferencia de los motores a gasolina (Quiyono, 2020).

Algunos detractores afirman que, en climas fríos, los motores diésel pueden funcionar peor que los de gasolina, pues al exponerse a temperaturas demasiado bajas, pueden presentar complicaciones al momento de arrancar y ponerse en marcha (RODES, 2017). Otra de las desventajas de estos motores es que, por la naturaleza de sus componentes, al momento de funcionar generan mayor ruido que los de gasolina. También hay que mencionar que los motores diésel suelen ser robustos y, por ende, son más pesados (Quiyono, 2020).

2.5 VENTAJAS Y DESVENTAJAS RELACIONADAS CON EL BIODIÉSEL

2.5.1 VENTAJAS

A diferencia del diésel, ya mencionado anteriormente, el biodiésel se obtiene principalmente de semillas oleaginosas y, por ello, está clasificado como una fuente renovable de energía.

El biodiésel es un combustible oxigenado, lo que provoca que tenga una combustión más completa, desfavoreciendo la formación y emisión de partículas. El CO es un producto tóxico resultante de la combustión incompleta de hidrocarburos. En presencia de suficiente oxígeno, el CO se convierte en CO₂, el cual no es tóxico para los seres humanos, pero sí para el medio ambiente. Varios estudios muestran que la opacidad del humo con el uso de biodiésel es generalmente menor (Llanes y col., 2017; Agarwal, 2007).

Investigaciones experimentales, realizadas en motores diésel, encontraron que las emisiones de hidrocarburos son mucho menores en el caso del biodiésel (Kalligeros y col., 2003; Agarwal, 1998).

El biodiésel no contiene azufre, por lo que en sus emisiones no se forman óxidos de azufre (SO_x), que contribuyen al efecto invernadero. Este combustible muestra una clara reducción de hollín y menor potencia mutagénica de partículas. Estas ventajas se deben probablemente a la ausencia de aromáticos (Bünger y col., 2000; Siegel y col., 1987).

2.5.2 DESVENTAJAS

La producción de biocombustibles, incluido el biodiésel, conlleva grandes problemas sociales y medioambientales, como la pérdida de bosques tropicales y de su biodiversidad, al requerir del establecimiento de plantaciones de palma aceitera, soya, etc. En la mayoría de los casos, las superficies para estos cultivos son a costa de fines alimenticios (Pulido, 2020).

Las propiedades del biodiésel se ven afectadas en climas fríos, ya que se forman cristales que pueden ocasionar obstrucciones en el sistema de inyección (Loctite, 2018).

No se puede usar en todos los motores del mercado, debe existir una enmienda emitida por el fabricante, donde se autorice su mezcla con cierto porcentaje de diésel. De lo contrario, pueden causarse averías en los inyectores, mangueras y juntas del motor.

El poder calorífico del biodiésel es menor que el del diésel, lo que supone una disminución de potencia (5.5%) y, por tanto, existe un aumento en el consumo del biocombustible (Villafán, 2019).

CAPÍTULO 3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 CASO DE ESTUDIO

Diariamente, y durante muchos años, en la Ciudad de México, se han tirado en los drenajes y en el suelo, miles de litros de aceite vegetal usado (aceite de fritura) y grasas animales, ya que no se les ha sabido dar un uso adecuado a tales desechos. Éstos provienen, principalmente, de los grandes restaurantes, de los negocios de comida corrida, de los pequeños puestos callejeros, de expendios de carnes y de los hogares, y pueden ser aprovechados para la elaboración de biodiésel.

De la misma manera, circulan diariamente millones de vehículos en la ciudad, tan solo, a finales del año 2020 y principios de 2021, se habían contabilizado un poco más de 45 millones. De los cuales 481,302 son camiones de pasajeros y 10,564,646 son camiones de carga. Pocas de estas unidades cuentan con certificaciones de control de emisiones contaminantes, se podría decir, que la mayoría de estas son unidades son antiguas y obsoletas, y que no cuentan con aditamentos que ayuden a mitigar las emisiones de CO₂, NO_x y SO_x.

Por otro lado, existen otros tipos de maquinarias que hacen uso del diésel como combustible, por ejemplo, como plantas de emergencia, bombas, excavadoras, tractores, etc., que no cumplen con algún tipo de restricción ni mitigantes de emisiones contaminantes. Con el uso del biodiésel, no solo se evita que se contaminen los suelos y que las aguas residuales sean más difíciles de limpiar y, por lo tanto, de reciclar, sino que, también, se pueden producir combustibles a bajo costo, capaces de competir con los combustibles fósiles, prometiendo ser una alternativa sustentable frente a ellos.

Además, este biocombustible puede ser utilizado en cualquier motor que opere con este ciclo, sin importar la función del vehículo, prometiendo disminuir algunas de las emisiones contaminantes. Finalmente es un combustible renovable, que es más amigable con el medio ambiente, ya sea si se usa en forma directa o en mezclas.

3.2 PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL

Para la elaboración del biodiésel, se debe apegarse a lo que estipula la norma ASTM D6751. Para obtener 20 litros de biodiésel, se utilizó el método de transesterificación. Dado que la relación de la producción del aceite de soya y el biodiésel es 1 a 1, es decir, por 1 litro de aceite se obtiene 1 litro de biodiésel, se parte de una base de 20 litros de aceite de soya virgen y se procede a calcular los reactantes, en el siguiente orden:

- 1) Calcular la masa del aceite vegetal a partir del volumen y la densidad.
- 2) Calcular la masa del catalizador. Utilizar el 1% del catalizador, tomando como base la masa del aceite; en este caso, se usará hidróxido de potasio (KOH).
- 3) Calcular los moles de aceite, basándose en su peso molecular y en la masa de aceite, previamente determinada. Para lograr una relación estequiométrica, mencionada anteriormente, por cada mol de aceite vegetal, se requieren, como mínimo, 3 moles de metanol.
- 4) Calcular los moles de metanol.
- 5) Con los moles de metanol obtenidos, calcular la masa y volumen del metanol a utilizar. Para asegurar la reacción, se debe duplicar el volumen de metanol.

Una vez calculado lo anterior, se vierte el catalizador en el metanol y se agita hasta disolver perfectamente el KOH. Esta mezcla, posteriormente, se vierte en el aceite y se coloca en una parrilla eléctrica con agitador magnético, a una temperatura de entre 50 a 55 °C, durante 90 minutos, para producir el biodiésel.

La Sociedad Americana de Ensayos y Materiales (ASTM, por sus siglas en inglés), propone evaluar, mediante distintas pruebas, la calidad y el correcto funcionamiento de los biocombustibles antes de ser utilizados en los motores. En la Tabla 3.1 se pueden apreciar las especificaciones de dichas pruebas.

Tabla 3.1 Especificaciones del biodiésel B100 (ASTM D6751-12, 2012a)

Parámetro	Límite		Unidades	Prueba
	mínimo	máximo		
Agua y sedimentos	-	0.050	% volumen	D2709
Azufre	-	0.050	% masa (PPM)	D5453
Cenizas sulfatadas	-	0.020	% masa	D874
Corrosión al cobre	-	No3		D130
Contenido de fósforo	-	0.001	% masa	D4951
Estabilidad a la oxidación	-	3	h min	EN14112
Glicerina libre	-	0.020	%masa	D6584
Glicerina total	-	0.240	%masa	D6584
Índice de acidez	-	0.5	mg KOH/g	D664
Número de cetano	47	-		D613
Punto nube	-	-	°C	D2500
Punto de inflamación	93		°C	D93
Residuos carbonosos	-	0.050	%masa	D4530
Temperatura equivalente atm (90%R)		360	°C	D1160
Viscosidad cinemática	1.9	6.0	mm ² /s	D445
Filtración en frío	-	200	S	D7501
Calcio, magnesio, potasio y sodio	5		PPM	EN14538

3.3 PRUEBAS EN EL MOTOR DIÉSEL

Las pruebas se realizaron en un conjunto generador, éste posee un motor de General Motors Company, modelo 2150 (Figura 3.1 y Figura 3.2), ubicado en el laboratorio de máquinas térmicas de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México.



Figura 3.1 Conjunto generador, con motor GMC diésel, modelo 2150 (vista isométrica)



Figura 3.2 Conjunto generador, con motor GMC diésel, modelo 2150 (vista lateral izquierda)

El motor diésel está acoplado a un generador eléctrico, el cual enciende un motor eléctrico, y éste, a su vez, está conectado a un freno hidráulico tipo Froude. Para conocer la eficiencia del motor diésel con el uso de diferentes combustibles, se debe de realizar lo siguiente:

- a) Cálculo del flujo volumétrico de combustible (Q_v) con las ecuaciones (3-1) y (3-2)

$$\text{Volumen (V)} = \frac{\pi D^2}{4} * h \text{ [m}^3\text{]} \quad (3-1)$$

$$Q_v = \frac{V}{t_c} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right] \quad (3-2)$$

Donde:

- D y h son el diámetro y altura, respectivamente, del depósito del combustible.
- Q_v es el flujo volumétrico de combustible.
- t_c es el tiempo que el combustible tardó en ser consumido por la máquina durante la prueba.

b) Calcular la masa de combustible (\dot{m}_c) con la expresión (3-3)

$$\dot{m}_c = Q_v (\rho_c) \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right] \quad (3-3)$$

c) Calcular la energía suministrada (E_e) con la ecuación (3-4)

$$\text{Energía Suministrada} = \dot{m}_c (\text{PCCD}) [\text{kW}] \quad (3-4)$$

Donde:

ρ_c es la densidad del combustible.

PCCD es el Poder Calorífico del Combustible Diésel.

d) Calcular la potencia del freno hidráulico (W_b) con la expresión (3-5)

$$W_b = (F) (d) (w) [\text{kW}] \quad (3-5)$$

Donde:

F = la fuerza aplicada al freno.

d = el brazo de palanca de la fuerza aplicada.

w = la velocidad angular del motor eléctrico y se puede expresar de la siguiente manera:

$$w = \frac{2\pi * N}{60s}$$

Reacomodando la expresión (3-5)

$$W_b = (F) (d) \left(\frac{2\pi * N}{60s} \right) [\text{kW}] \quad (3-6)$$

Donde:

N = número de revoluciones por minuto del motor eléctrico.

- e) Calcular la energía aprovechada (E_a) con la expresión (3-7)

$$\text{Energía aprovechada} = \frac{W_b}{\eta_{\text{combinada}}} \text{ [kW]} \quad (3-7)$$

Donde:

W_b es la potencia al freno hidráulico.

$\eta_{\text{combinada}}$ es la eficiencia combinada. El laboratorio de máquinas térmicas de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, define la eficiencia combinada ($\eta_{\text{combinada}}$) como el producto entre la eficiencia del generador eléctrico (η_{GE}) y la eficiencia mecánica (η_{ME}) y ésta tiene un valor igual a 85%.

- f) Se calcula la eficiencia del motor con la expresión (3-8)

$$\eta_{\text{MD}} = \frac{\text{Energía Aprovechada}}{\text{Energía Suministrada}} \quad (3-8)$$

3.4 MEDICIÓN DE EMISIONES

Para realizar las mediciones de las emisiones, se utilizó un analizador de gases, de la marca **E INSTRUMENTS** modelo **F5000** (Figura 3.3).



Figura 3.3 Equipo F5000 (E INSTRUMENTS, 2017)

Este equipo portátil se puede usar en automóviles, camiones, autobuses, montacargas y otro tipo de vehículos que funcionen con gasolina, diésel, propano, gas licuado de

petróleo y gas natural. Puede calcular la relación aire/combustible y el factor *lambda* del motor; además, utiliza sensores electromecánicos y sensores infrarrojos no dispersivos para medir el oxígeno (O₂), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), hidrocarburos (HC) y óxidos de nitrógeno (NO/NO_x). Dichas mediciones se pueden guardar, imprimir o enviar a una computadora. Cuenta con una sonda, que se introduce en el tubo de escape del vehículo, para realizar las lecturas; ésta puede trabajar a una temperatura máxima de 800°C (E INSTRUMENTS, 2017).

Para utilizar el equipo se debe esperar unos segundos para que se calibre en ceros, con aire fresco (estos ceros se verán en la pequeña pantalla del equipo), finalmente, con el motor en funcionamiento, insertar la sonda del equipo en el tubo de los gases de escape. Una bomba en el interior del F5000 extrae una muestra de los gases de escape; esta muestra es acondicionada y filtrada por el equipo, para que los sensores puedan analizar su contenido, calcular y mostrar los resultados. Asimismo, el F5000 se puede utilizar para diagnosticar problemas relacionados con los motores, programar y realizar los mantenimientos, aumentar el rendimiento y la eficiencia y ahorrar combustible.

3.5 METODOLOGÍA

Bajo la normativa seleccionada, se procede a calcular los reactivos para la elaboración de 20 litros de biodiésel por el método de transesterificación. Al finalizar la elaboración de biodiésel, se utilizan 6 litros para evaluar los parámetros y especificaciones que pide la norma, los 14 litros restantes, se usarán para las pruebas en el motor. Si el biocombustible pasa las pruebas, se considera que la transesterificación se hizo correctamente, de lo contrario, se debe repetir el proceso hasta lograr las especificaciones establecidas. Una vez que la transesterificación fue exitosa, se procede a realizar las mezclas B10 que serán utilizadas en el motor de combustión interna.

Se realizaron 2 pruebas; en la primer prueba se utilizó combustible diésel al 100% y la segunda biodiésel B10 (90% diésel PEMEX y 10% biodiésel a base de soya). Esto se realizó con el objetivo de tener una referencia y realizar una comparativa con respecto al uso del biocombustible. Los combustibles se colocaron en el depósito del motor, y a su vez, se prepara y calibra el analizador de gases que medirá las emisiones

contaminantes. En cuanto se encienda el motor, el analizador de gases debe comenzar a tomar lectura de los datos, por ello es importante que ambos (motor y analizador) se sincronicen. Al finalizar las pruebas, se recopilan los datos tomados por el analizador. Estos datos son llevados a una computadora para ser ordenados, procesados y analizados en el programa MATLAB® R2020b (versión 9.9 estudiantil) y posteriormente, generar líneas de tendencia polinómicas, que describan el comportamiento de los datos obtenidos. Esto con el fin de cuantificar la cantidad de emisiones emitidas en cada prueba. En la Figura 3.4 se puede apreciar el diagrama de la metodología antes mencionada.

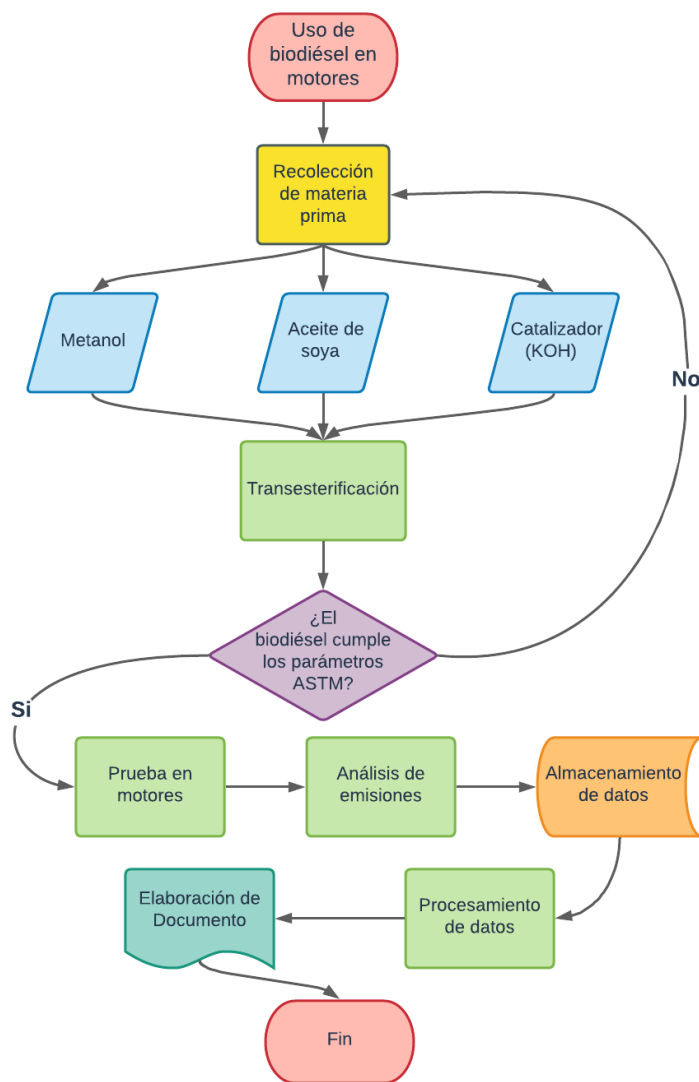


Figura 3.4 Diagrama de la metodología

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

4.1 PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL

Como se mencionó anteriormente, en el capítulo 3, subcapítulo 3.2, se utilizó el método de transesterificación para producir el biodiésel. Para producir los 20 litros de biodiésel a partir de aceite de soya virgen, se procede a calcular la cantidad adecuada de reactivos mediante el siguiente procedimiento:

i. Densidad de aceite vegetal

$$\rho_A = (0.92 \frac{\text{kg}}{\text{L}}) @ 20 \text{ }^\circ\text{C (INECC, 2020)}$$

ii. Volumen de aceite a utilizar

$$V_A = (20 \text{ L})$$

iii. Calcular de la masa del aceite vegetal

$$m_A = \rho_A(V_A) = (0.92 \frac{\text{kg}}{\text{L}})(20 \text{ L}) = m_A = 18.4\text{kg}$$

iv. Calcular la masa del catalizador (Hidróxido de potasio KOH)

Se debe utilizar el 1% de catalizador, con respecto a la masa del aceite, por lo tanto se debe usar 0.184 kg de hidróxido de potasio.

$$m_{\text{KOH}} = 0.184 \text{ kg}$$

v. Calcular moles de aceite de soya

Fórmula molecular del aceite de soya = $\text{C}_{11}\text{H}_{19}\text{N}_3\text{O}_2\text{Na}$ (ChemSrc, 2021)

Peso molecular del aceite de soya = $P_{MA} = 238.20 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$ (ChemSrc, 2021)

Masa de aceite = $m_A = 18.4\text{kg}$

$$\text{Moles de aceite} = \frac{m_A}{P_{MA}} = \frac{18,400 \text{ g}}{238.20 \frac{\text{g}}{\text{mol}}} = 77.2460 \text{ mol}$$

vi. Calcular moles de metanol a utilizar

Para lograr una reacción estequiométrica, por cada mol de aceite vegetal, se requieren, como mínimo, 3 moles de metanol (Figura 4.1), por lo tanto, para 77.2460 moles de aceite, se requieren 231.738 moles de metanol.

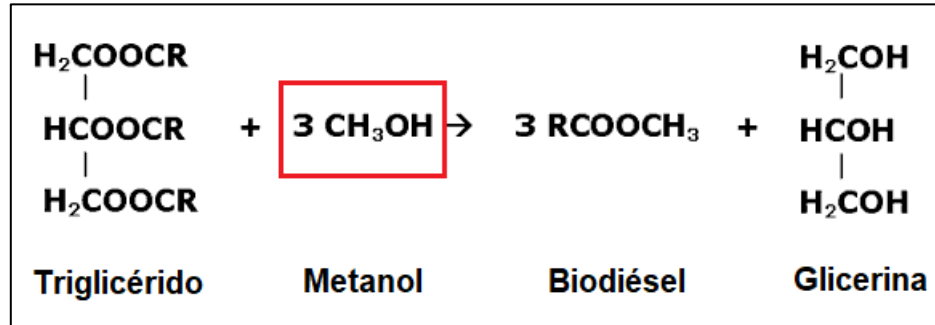


Figura 4.1 Reacción estequiométrica del biodiésel (Cerdeira y col.)

$$\text{Peso molecular del metanol (CH}_3\text{OH)} = P_{mM} = 32.04 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$$

$$\text{Densidad del metanol} = \rho_M = (0.792 \frac{\text{kg}}{\text{L}}) @ 20 \text{ }^\circ\text{C} \quad (\text{USCG, 1999})$$

vii. Calcular masa y volumen de metanol a utilizar

$$\text{Masa de metanol (} m_M \text{)} = (231.738 \text{ mol}) (32.04 \frac{\text{g}}{\text{mol}}) = 7,424.88 \text{ g} = \boxed{7.425 \text{ kg}}$$

$$\text{Volumen de metanol a utilizar} = \frac{m_M}{\rho_M} = \frac{7.425 \text{ kg}}{0.792 \frac{\text{kg}}{\text{L}}} = \boxed{9.38 \text{ L}}$$

Una vez calculado lo anterior, se vertieron los 184 gramos de KOH en los 9.38 litros de metanol, se revolvió la mezcla hasta disolver perfectamente, obteniendo así una fluido homogéneo. Posteriormente, esta nueva mezcla de metanol con KOH se vierte en los 20 litros de aceite y se pone a calentar entre 50 a 55 °C durante 90 minutos. Es en este paso donde se da la transesterificación y la producción de biodiésel.

viii. Eficiencia de la producción de biodiésel

Para medir la eficiencia de la producción de biodiésel, se debe medir el volumen de biodiésel y el volumen de glicerina, obtenidos al final de la transesterificación. Primeramente, la teoría sugiere que, la relación de la producción de biodiésel es 1 a 1, es decir, por cada litro de aceite vegetal, se debe obtener un litro de biodiésel. Mencionado anteriormente, en el subcapítulo 4.1 Producción de biodiésel, para esta investigación se utilizaron 20 litros de aceite vegetal y la cantidad obtenida de biodiésel fue de 19.85 litros. Con lo anterior, se puede decir que se tuvo una eficiencia de 99.25% en la producción del biocombustible.

Por otro lado, cuando se produce biodiésel, se debe cumplir que, por cada 100 litros de aceite, al final de la transesterificación, se debe obtener el equivalente al 16% en volumen de glicerina, es decir 16 litros. Lo anterior indica que el proceso fue correcto, según la estequiometría. En este trabajo, de los 20 litros de aceite vegetal utilizado, se obtuvieron 3.1 litros de glicerina, es decir el 15.5% equivalente en volumen. En la Figura 4.2 se puede apreciar la separación, por densidades, de una muestra de biodiésel (color ámbar) y glicerina (color café-rojizo).



Figura 4.2 Muestra de biodiésel con glicerina

4.2 PARÁMETROS DE MEDICIÓN

Mencionado en el capítulo 3, subcapítulo 3.5, de los 20 litros de biodiésel elaborado, se utilizan 6 litros para evaluar los parámetros sugeridos por la ASTM. A continuación, en la Tabla 4.1 se enlistan los resultados de los parámetros evaluados.

Tabla 4.1 Resultados promedio del triplicado de la caracterización fisicoquímica del biodiésel generado para las pruebas experimentales

Parámetro	ASTM D6751		Resultados LAEL		Unidades
	mínimo	máximo	mínimo	máximo	
Agua y sedimentos	-	0.050	-	0.045	%volumen
Azufre	-	0.050	-	0.050	%masa (PPM)
Cenizas sulfatadas	-	0.020	-	0.012	%masa
Corrosión al cobre	-	No3	-	No3	
Contenido de fósforo	-	0.001	-	0.00085	%masa
Estabilidad a la oxidación	-	3	-	3	h min
Glicerina libre	-	0.020	-	0.016	%masa
Glicerina total	-	0.240	-	0.200	%masa
Índice de acidez	-	0.5	-	0.5	mg KOH/g
Número de cetano	47	-	48	-	
Punto nube	-	-	-	-	°C
Punto de inflamación	93	-	93	-	°C
Residuos carbonosos	-	0.050	-	0.045	%masa
Temperatura equivalente atm (90%R)	-	360	-	345	°C
Viscosidad cinemática	1.9	6.0	2.0	5.5	mm ² /s
Filtración en frío	-	200	-	184	S
Calcio, magnesio, potasio y sodio	5	-	5.5	-	PPM

Se puede observar que los resultados obtenidos en las pruebas, están dentro de los rango permitidos por la ASTM, por lo tanto, el biodiésel elaborado cumple los estándares internacionales y puede ser utilizado en motores de combustión interna sin ningún problema.

4.3 PRUEBAS EN EL MOTOR

El conjunto generador de motor diésel, descrito en el capítulo 3, subcapítulo 3.3, tiene un tanque de combustible con forma de prisma rectangular con ciertas dimensiones. En la parte superior de éste, el laboratorio de máquinas térmicas adaptó una probeta graduada (Figura 4.3). Conociendo las dimensiones de dicha probeta, la altura de combustible consumida durante las pruebas y con ayuda de un cronómetro, se pueden conocer los consumos de combustible de las pruebas.



Figura 4.3 Ubicación del tanque de combustible y probeta del motor GMC 2150

4.3.1 PRIMER PRUEBA (COMBUSTIBLE DIÉSEL)

En el capítulo 3, subcapítulo 3.3, se describe el proceso necesario para calcular la eficiencia del motor diésel GMC modelo 2150. Para calcular dicha eficiencia, es necesario recabar algunos datos de los equipos utilizados. Los datos obtenidos, de la primer prueba, se muestran en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2 Datos obtenidos de la primer prueba (combustible diésel)

Parámetro	Lectura
Fuerza de freno aplicada	5 kg
Brazo de palanca del freno	48.38 cm
Revoluciones del motor eléctrico	3000 RPM
Duración de la prueba	770 segundos
Altura de combustible consumida	16 cm
Voltaje generado	215 volts
Corriente generada	30 amperes

Para calcular la eficiencia del conjunto generador, se realizaron los siguientes cálculos:

a) CÁLCULO DE FLUJO VOLUMÉTRICO DE COMBUSTIBLE (Q_v)

En la Tabla 4.3 se enlistan las dimensiones medidas de la probeta graduada que contiene el combustible diésel.

Tabla 4.3 Dimensiones de la probeta graduada del depósito del combustible

Dimensiones de la probeta	Lectura
Diámetro del cilindro (D)	9.2 cm → 0.092 m
Radio (r)	4.6 cm → 0.046 m
Altura consumida de combustible (h)	16 cm → 0.16 m

Con los datos anteriores y las expresiones (3-1) y (3-2), se calculó el flujo volumétrico de combustible.

$$(3-1) \text{ Volumen (V)} = \frac{\pi D^2}{4} * h = 1.0636E^{-3} \text{ m}^3$$

$$(3-2) Q_v = \frac{V}{t_c} = \frac{1.0636E^{-3} \text{ m}^3}{770 \text{ seg}} = 1.3813E^{-6} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

b) CÁLCULO DE MASA DEL COMBUSTIBLE (\dot{m}_c)

Con el resultado obtenido de la ecuación (3-2), se sustituye en la ecuación (3-3) para calcular la masa del combustible.

$$(3-3) \dot{m}_c = (Q_v) (\rho_c) \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]$$

Donde:

$$\rho_c \text{ es la densidad del combustible} = 870 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \text{ (PEMEX DIESEL, 2016)}$$

Por lo tanto:

$$\dot{m}_c = (1.3813\text{E}^{-6} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}) (870 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}) = 1.2017\text{E}^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

c) CÁLCULO DE LA ENERGÍA SUMINISTRADA (E_e)

El resultado obtenido de la ecuación (3-3), ahora se sustituye en la nueva ecuación (3-4).

$$(3-4) E_e = (\dot{m}_c) (\text{PCCD}) [\text{kW}]$$

Donde:

PCCD es el Poder Calorífico del Combustible Diésel = $42,900 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$ (Scott y Alpízar, 2017)

$$E_e = (1.2017\text{E}^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{s}}) (42,900 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}) = 51.5551 \text{ kW}$$

d) POTENCIA AL FRENO (W_b)

Con los datos de la Tabla 4.2 y la ecuación (3-6), se calcula la potencia al freno.

$$(3-6) W_b = (F) (d) \left(\frac{2\pi * N}{60s} \right) [\text{kW}]$$

Los valores para esta prueba fueron:

$$F = 5 \text{ kg} = 49.05 \text{ N} = 0.04905 \text{ kN}$$

$$d = 0.4838 \text{ m}$$

$$N = 3000 \text{ RPM}$$

$$W_b = (0.04905 \text{ kN}) (0.4838 \text{ m}) \left(\frac{2\pi \cdot 3000}{60 \text{ s}} \right) = \mathbf{7.4551 \text{ kW}}$$

e) ENERGÍA APROVECHADA (E_a)

Una vez obtenido el valor de W_b , y con la ecuación (3-7), se puede calcular la energía aprovechada E_a .

$$(3-7) E_a = \frac{7.4551 \text{ kW}}{0.85} = \mathbf{8.7707 \text{ kW}}$$

f) EFICIENCIA DEL MOTOR DIÉSEL (η_{MD})

Finalmente con la ecuación (3-8) y con los resultados obtenidos de las ecuaciones (3-4) y (3-7), se puede calcular la eficiencia del motor GMC 2150.

$$(3-8) \eta_{MD} = \frac{\text{Energía Aprovechada}}{\text{Energía Suministrada}} = \frac{E_a}{E_e} = \frac{8.7707 \text{ [kW]}}{51.5551 \text{ [kW]}} \times 100 = \mathbf{17.0123\%}$$

4.3.2 SEGUNDA PRUEBA (BIODIÉSEL B10)

Para la segunda prueba se realizó una mezcla B10. Esta mezcla contenía 10 litros de diésel comercial (PEMEX) por 1 litros de biodiésel elaborado. Al igual que en la primer prueba, se deben recopilar los datos reportados por los equipos, éstos se muestran en la Tabla 4.4. Finalmente, se calculó la eficiencia del motor GMC 2150, con el uso del biodiésel B10, siguiendo los mismos pasos descritos en la primer prueba (combustible diésel). En la Tabla 4.5 se pueden comparar los resultados obtenidos de ambas pruebas.

Tabla 4.4 Datos obtenidos de la segunda prueba (biodiésel B10)

Parámetro	Lectura
Fuerza de freno aplicada	5 kg
Brazo de palanca del freno	48.38 cm
Revoluciones del motor eléctrico	2750 RPM
Duración de la prueba	1037 segundos
Altura de combustible consumida	21.06 cm
Voltaje generado	210 volts
Corriente generada	28 amperes

Tabla 4.5 Resultados de las pruebas con diésel y biodiésel B10

	Primer prueba (combustible diésel)	Segunda prueba (biodiésel B10)	Unidades
Flujo volumétrico de combustible (Q_v)	1.3813E ⁻⁶	1.3500E ⁻⁶	$\frac{m^3}{s}$
Masa de combustible (\dot{m}_c)	1.2017E ⁻³	1.175E ⁻³	$\frac{kg}{s}$
Energía Suministrada (E_e)	51.5551	50.3878	kW
Potencia al freno (W_b)	7.4551	6.8339	kW
Energía aprovechada (E_a)	8.7707	8.0398	kW
Eficiencia del motor diésel (η_{MD})	17.0123	15.9558	%

Basado en pruebas anteriores, realizadas minuciosamente, el laboratorio de máquinas térmicas de la Facultad de Ingeniería (LMTFI) menciona que la eficiencia del motor GMC 2150 ronda entre 18% y 20%, es decir, del total del combustible que es consumido, sólo ese porcentaje es aprovechado en trabajo útil. Por lo tanto, para la primer prueba, realizada con combustible diésel, se puede apreciar que la eficiencia calculada resulta estar cercana al rango establecido por el LMTFI.

En la caso de la segunda prueba, se puede apreciar que el flujo de combustible (Q_v) disminuye, comparado con la primer prueba. Muchos estudios realizados revelan que los motores consumen más combustible cuando operan a plena carga. La primera prueba tuvo una duración total de 770 segundos; el tiempo de operación a plena carga (con el motor eléctrico en funcionamiento) fue de 620 segundos; y pese a que la prueba con biodiésel B10 tuvo una duración total de 1,037 segundos, el tiempo en que el motor operó con carga aplicada fue de 500 segundos. Así, era de esperarse que la prueba con diésel haya consumido un poco más combustible que la prueba con biodiésel B10.

Por otro lado, se aprecia que, con el uso del biodiésel B10, la eficiencia final obtenida es menor que con el uso del diésel. La teoría dice que con el biodiésel, la eficiencia en los motores disminuye; esto, debido a que el poder calorífico del biodiésel es menor que el diésel.

En los cálculos realizados para la segunda prueba, se utilizó el poder calorífico del diésel para la mezcla B10. Esto no es del todo correcto, ya que, para obtener mejores resultados, se debe realizar la mezcla de diésel–biodiésel (para cualquier porcentaje) y determinar el poder calorífico de esta mezcla con un calorímetro. Al hacer lo anterior, se esperaría tener un poder calorífico más bajo para la mezcla.

De igual forma, se apreció la caída de la eficiencia en las lecturas de voltaje y corriente. A pesar de que ambos experimentos se realizaron bajo las mismas condiciones de humedad, temperatura y presión atmosférica, resultó que el trabajo entregado por el conjunto generador no fue el mismo, ya que, son menores las revoluciones que alcanza el motor eléctrico, el voltaje generado y la corriente, con el uso del biocombustible.

4.4 OPERACIÓN DEL EQUIPO DE MEDICIÓN DE EMISIONES Y LECTURA DE EMISIONES CONTAMINANTES

Para un inicio rápido, el fabricante sugiere seguir los pasos descritos a continuación:

- a) Encender el analizador. Al hacerlo, la bomba del instrumento se encenderá inmediatamente y aparecerá la leyenda "E INSTRUMENTS". Después, asegurarse de que el analizador esté aspirando aire limpio a temperatura ambiente; presionar la tecla OK, para iniciar el autocero (para iniciar manualmente el autocero en un momento posterior, se debe presionar la tecla CALIB).
- b) Una vez completado el autocero, conectar la sonda y la línea de muestreo al analizador en el puerto "Sample In".
- c) Presionar la tecla SETUP, para configurar los parámetros apropiados, como el combustible, unidades, fecha y hora, etc., como se aprecia en la Figura 4.4.
- d) Al final del periodo de autocero, todos los sensores en la pantalla deben indicar una lectura de ceros (Figura 4.5), a excepción del sensor de oxígeno (O₂), que debe tener una lectura aproximada de 20.9% (concentración en el aire ambiente).

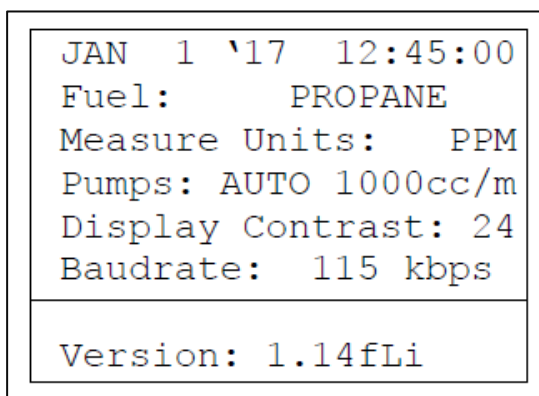


Figura 4.4 Configuración de parámetros en el analizador (E INSTRUMENTS, 2017)

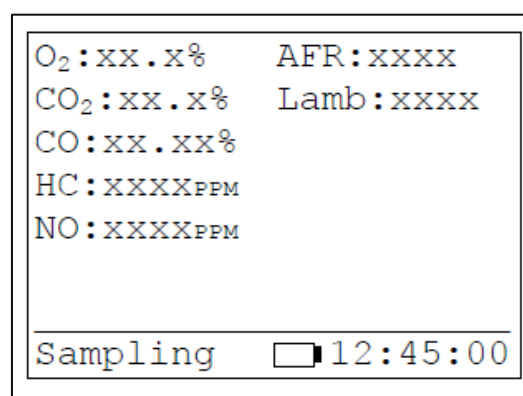


Figura 4.5 Ejemplo de lectura de parámetros medidos (E INSTRUMENTS, 2017)

- e) Insertar la sonda del analizador en el tubo de escape del motor.

- f) Presionar la tecla MEASURE, para ver los parámetros de emisiones que están siendo medidos.
- g) Los datos medidos se pueden almacenar en la memoria interna del analizador o en una memoria tipo USB.

Una vez que se extraen los datos del equipo, éstos son llevados al programa MATLAB® para ser organizados, analizados y generar las gráficas correspondientes.

En las siguientes Figuras, la línea de color negro representa la lectura de datos de la primera prueba (combustible diésel) y la línea verde representa los de la segunda prueba (biodiésel B10). En la Figura 4.6 se muestra la cantidad de oxígeno, medido por el analizador, durante las dos pruebas.

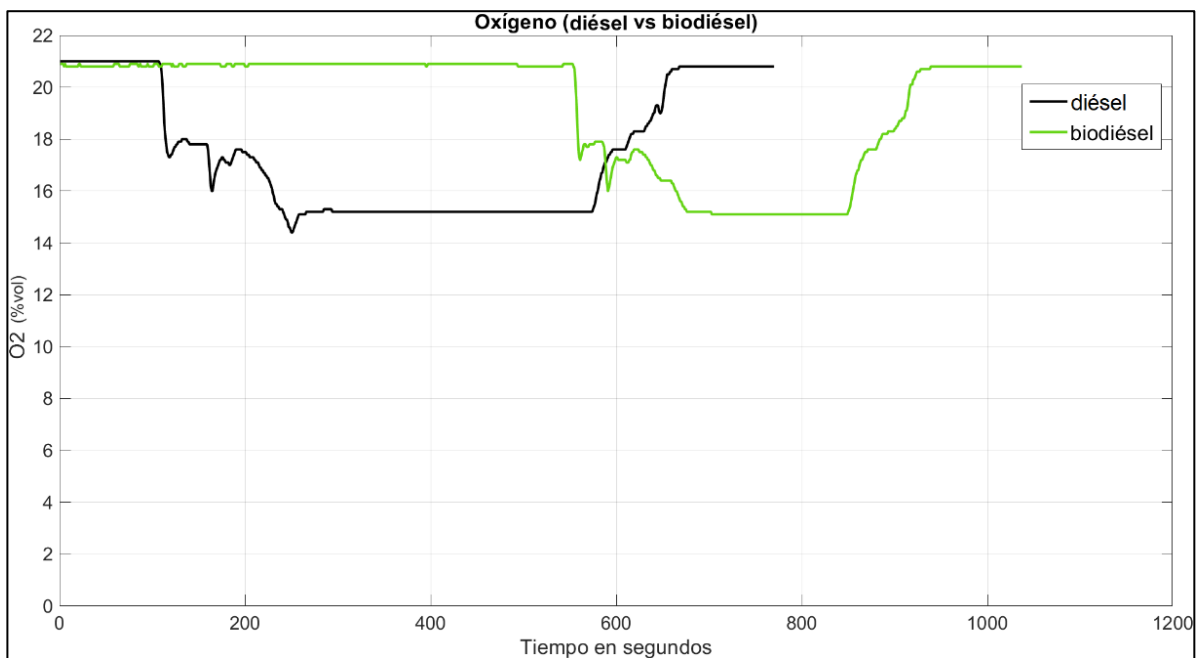


Figura 4.6 Cantidad de oxígeno arrojado en la prueba con combustible diésel y con biodiésel B10

En la Figura 4.7 se muestra la cantidad de monóxido de carbono, medida por el analizador, durante las pruebas.

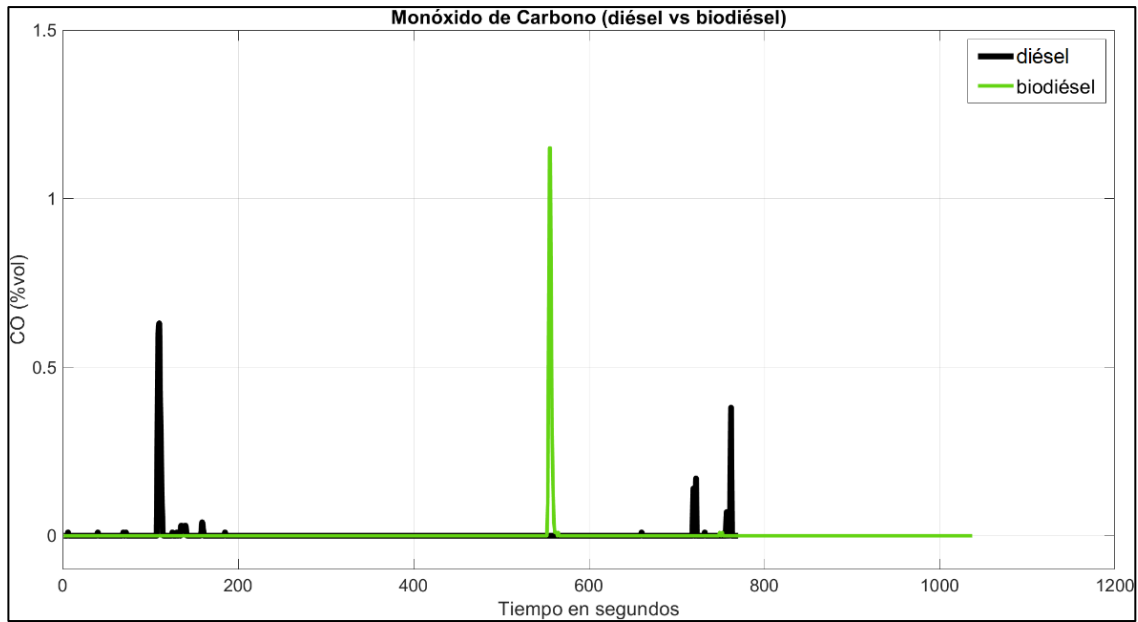


Figura 4.7 Cantidad de monóxido de carbono emanado en la prueba con combustible diésel y con biodiésel B10

En la Figura 4.8 se muestra la cantidad de dióxido de carbono, medido por el analizador, durante las pruebas.

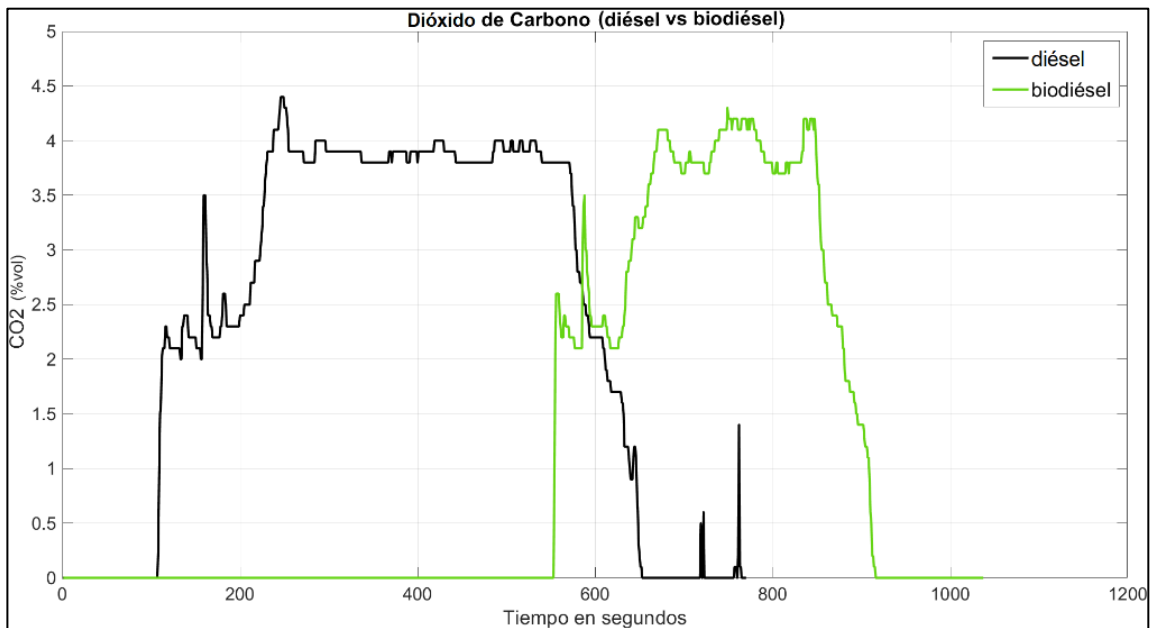


Figura 4.8 Cantidad de dióxido de carbono emitido en la prueba con combustible diésel y con biodiésel B10

En la Figura 4.9 se muestra la cantidad de hidrocarburos no quemados, medidos por el analizador, durante las pruebas.

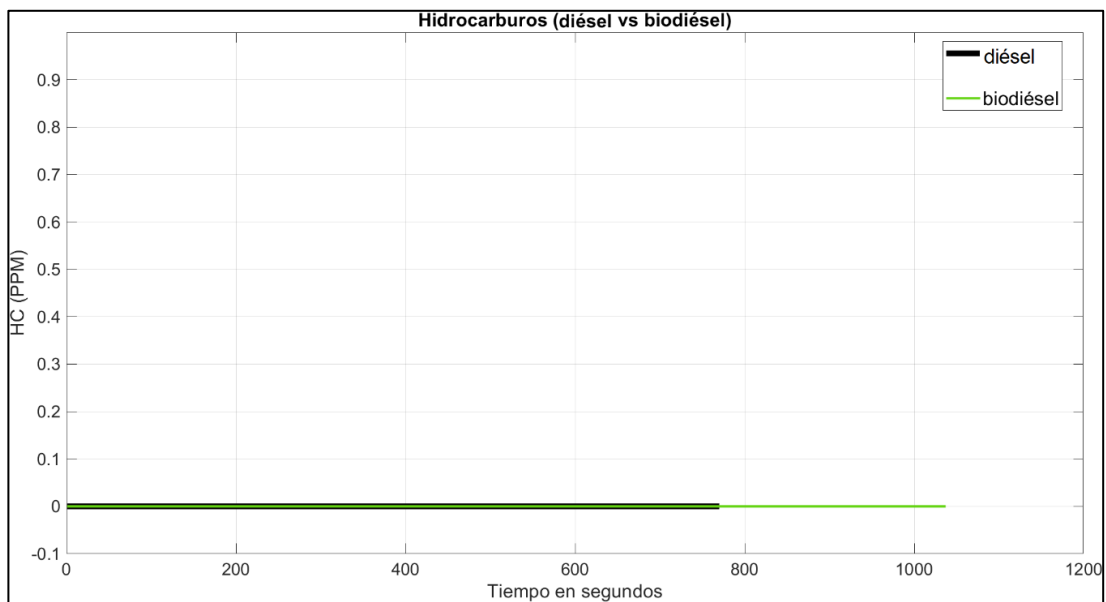


Figura 4.9 Lectura de hidrocarburos no quemados, en partes por millón, en la prueba con combustible diésel y con biodiésel B10

Por último, en la Figura 4.10 se muestra la cantidad de óxidos de nitrógeno, medidos por el analizador, durante las pruebas.

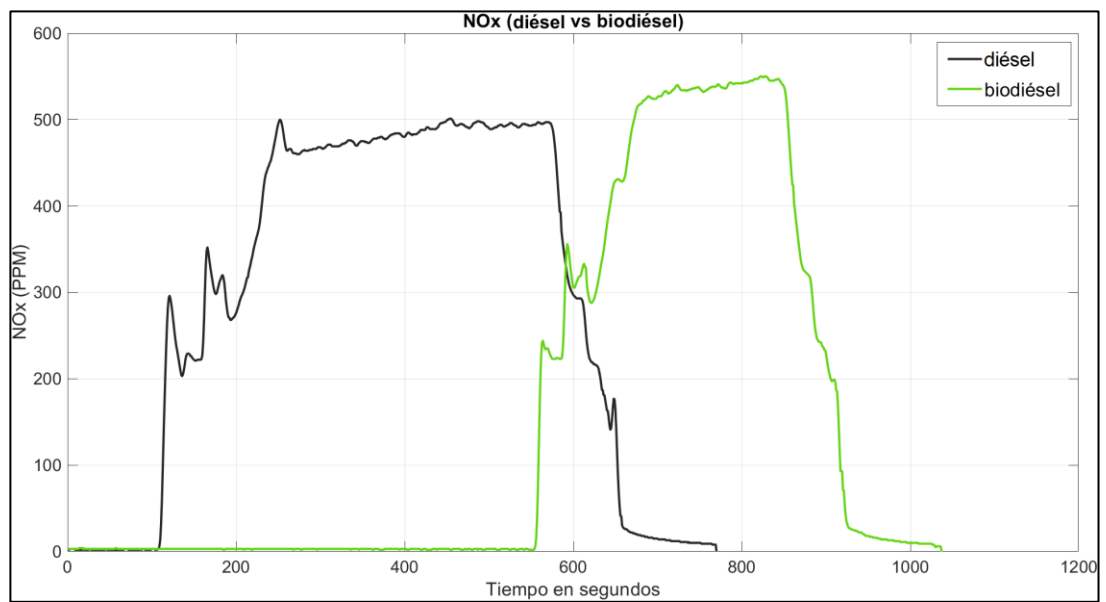


Figura 4.10 Lectura de óxidos de nitrógeno, en partes por millón, en la prueba con combustible diésel y con biodiésel B10

Por otra parte, a excepción de las Figuras 4.7 y 4.9, se puede apreciar un comportamiento particular en las demás, tanto en las lecturas de la primer prueba (combustible diésel), como en las lecturas de la segunda prueba (biodiésel B10). En el instante en el que se enciende el conjunto generador, comienza la lectura de datos en el analizador de gases. Las lecturas empiezan siendo constantes (trazo de línea horizontal); en el segundo 112 y 560, se aprecia un cambio repentino en la lectura de los datos del diésel y del biodiésel B10, respectivamente. Este cambio se genera justo en el instante en que se le aplica la carga al motor diésel, es decir, el momento en que se acciona el motor eléctrico con el freno tipo Froude colocado.

El programa tiene la función de generar líneas de tendencia polinómicas de distintos ordenes, que describen el comportamiento de los datos introducidos (lecturas del analizador), con su respectiva ecuación. Con la finalidad de cuantificar los gases leídos por el analizador, se generaron líneas de tendencia polinómicas desde 6to orden hasta 10mo orden, se observó su comportamiento, se optó por las ecuaciones cuyo comportamiento fuera lo más similar posible a las lecturas del analizador, para cada compuesto, y al final, con las ecuaciones seleccionadas, se procede a calcular el áreas bajo la curva.

Se podría pensar que, entre mayor sea el orden del polinomio, más acertado será el comportamiento del polinomio, pero esto no sucede así, al contrario, mientras se incrementa el orden del polinomio, el comportamiento de las líneas de tendencia empeoraba. Este procedimiento se realizó, por separado, tanto para los resultados de la primer prueba (combustible diésel) como para la segunda prueba (biodiésel B10). Los resultados se muestran a continuación:

a) OXÍGENO (O₂)

a.1) PRIMER PRUEBA (COMBUSTIBLE DIÉSEL)

En la Figura 4.11 se puede apreciar la lectura de datos del oxígeno (línea negra), leídas por el analizador, de la primer prueba (combustible diésel). La línea de tendencia polinómica, que describe el mejor comportamiento de los datos (línea morada), es de 6to orden y se presenta su respectiva ecuación (4-1).

$$(4-1) \quad y = (-7.8e^{-15}x^6) + (1.769e^{-11}x^5) - (1.533e^{-8}x^4) + (6.338e^{-6}x^3) - (0.001218x^2) + (0.0677x) + (20.26)$$

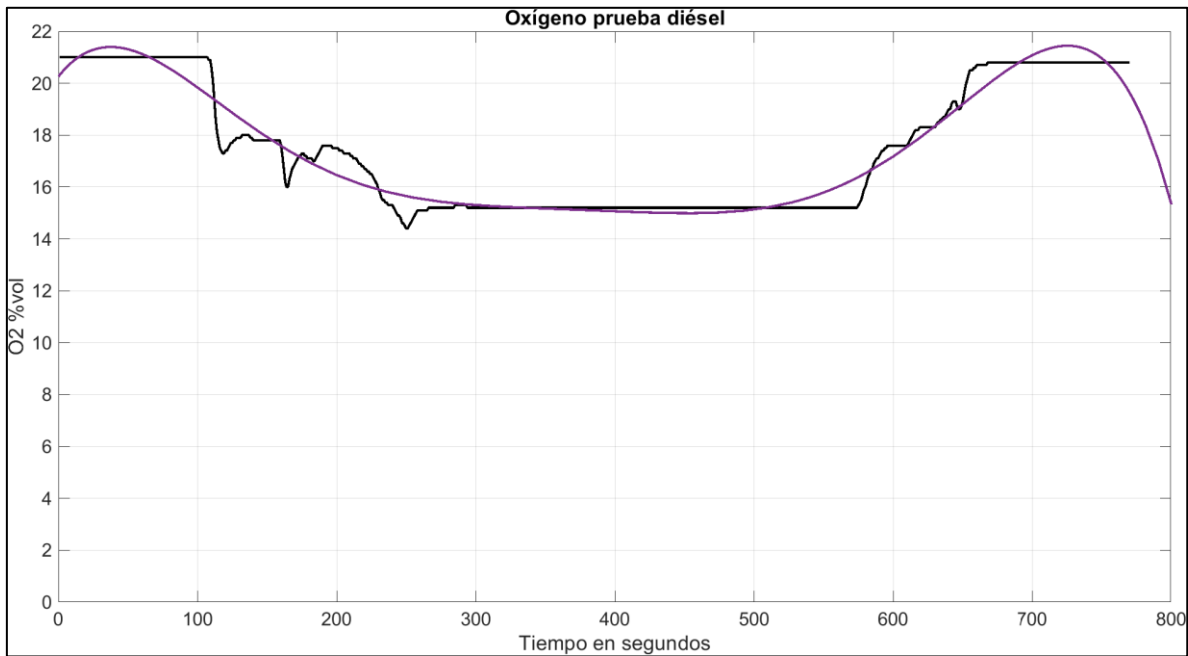


Figura 4.11 Comportamiento de la línea de tendencia polinómica de 6to orden sobre la lectura de datos del oxígeno de la primer prueba

Con la ecuación proporcionada por el programa, se procede a calcular el área bajo la curva, desde cero hasta 770, que fue el tiempo, en segundos, que duró esta prueba (ver Tabla 4.2). El valor del área es de:

$$A = 13,090 \text{ unidades}^2$$

a.2) SEGUNDA PRUEBA (BIODIÉSEL B10)

Se observa en la Figura 4.12, la lectura de datos del oxígeno (trazo verde) tomados por el analizador durante la segunda prueba. Para este caso, la línea de tendencia polinómica, que mejor describe el comportamiento de los datos, es de 7mo orden (trazo rojo). Se presenta a continuación la ecuación de dicha línea:

$$(4-2) \quad y = (-1.269e^{-18}x^7) + (2.806e^{-15}x^6) - (1.4e^{-12}x^5) - (7.281e^{-10}x^4) + (7.802e^{-7}x^3) - (0.0002065x^2) + (0.01851x) + (20.47)$$

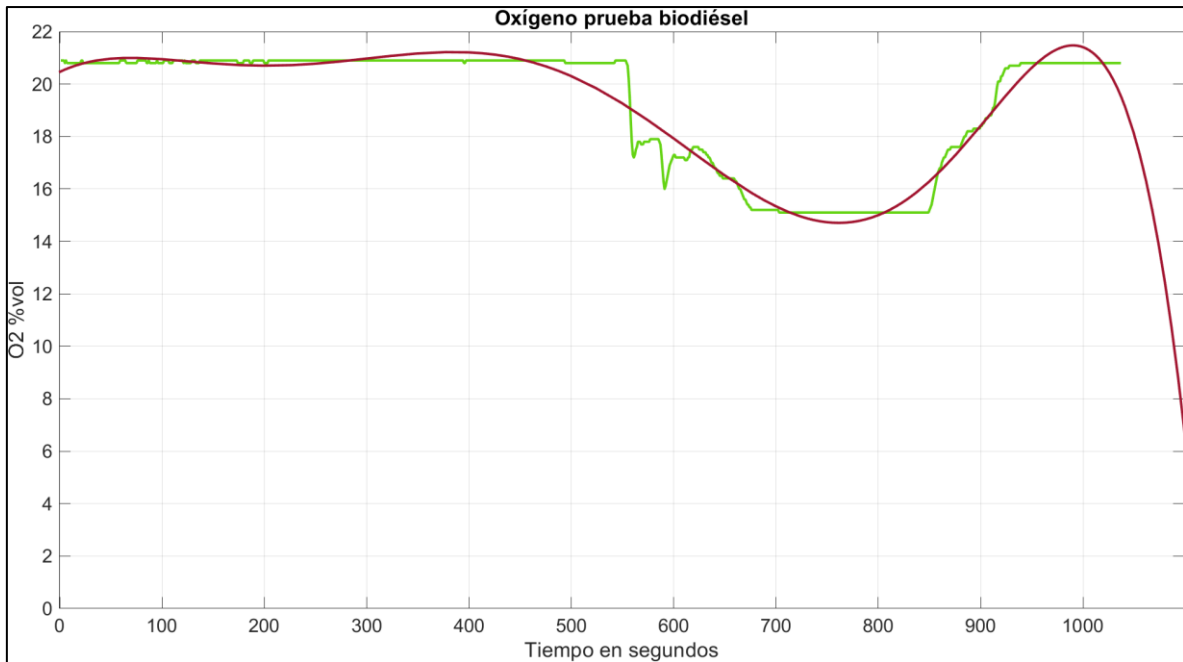


Figura 4.12 Comportamiento de la línea de tendencia polinómica de 7mo orden sobre la lectura de datos del oxígeno de la segunda prueba

De la misma forma que en la primer prueba, se procede a calcular el área bajo la curva con la ecuación proporcionada por el programa, desde cero hasta 1037, que fue el tiempo, en segundos, que duró esta prueba (ver Tabla 4.3). El valor del área es de:

$$A = 19,994 \text{ unidades}^2$$

Se puede apreciar que la lecturas de O_2 , en la primer prueba (combustible diésel) y la segunda prueba (biodiésel B10), comienzan con un valor constante igual a 21 y 20.8, respectivamente. Al colocar la carga al motor, esta lectura decae debido a que el oxígeno empieza a reaccionar para formar CO_2 . Ya que las pruebas tuvieron una duración muy distinta con la carga aplicada, se hace un análisis del valor por segundo de O_2 . En el caso de la primer prueba, el valor es de 17 O_2 (%vol.) por segundo, y para la segunda, de 19.2806 O_2 (%vol.) por segundo. El biodiésel es considerado como un combustible oxigenado, por lo que resulta entendible que las lecturas de oxígeno resulten mayores con su uso.

b) DIÓXIDO DE CARBONO (CO₂)

b.1) PRIMER PRUEBA (COMBUSTIBLE DIÉSEL)

En la Figura 4.13, se observa que la lectura de los datos se realiza hasta el segundo 770. Del segundo cero al 107, la lectura de datos es nula, ya que fue el tiempo que se tardó en aplicar la carga al motor. Sucede lo mismo del segundo 653 (donde se retira la carga del motor) al el segundo 770 (cuando se apaga el motor). Con base en lo anterior, se optó por eliminar estos datos nulos, ya que no generan un área de interés, por lo tanto, el área que interesa desde el segundo 107 hasta 653, es decir, desde cero hasta 546, quedando la gráfica como se muestra en la Figura 4.13.

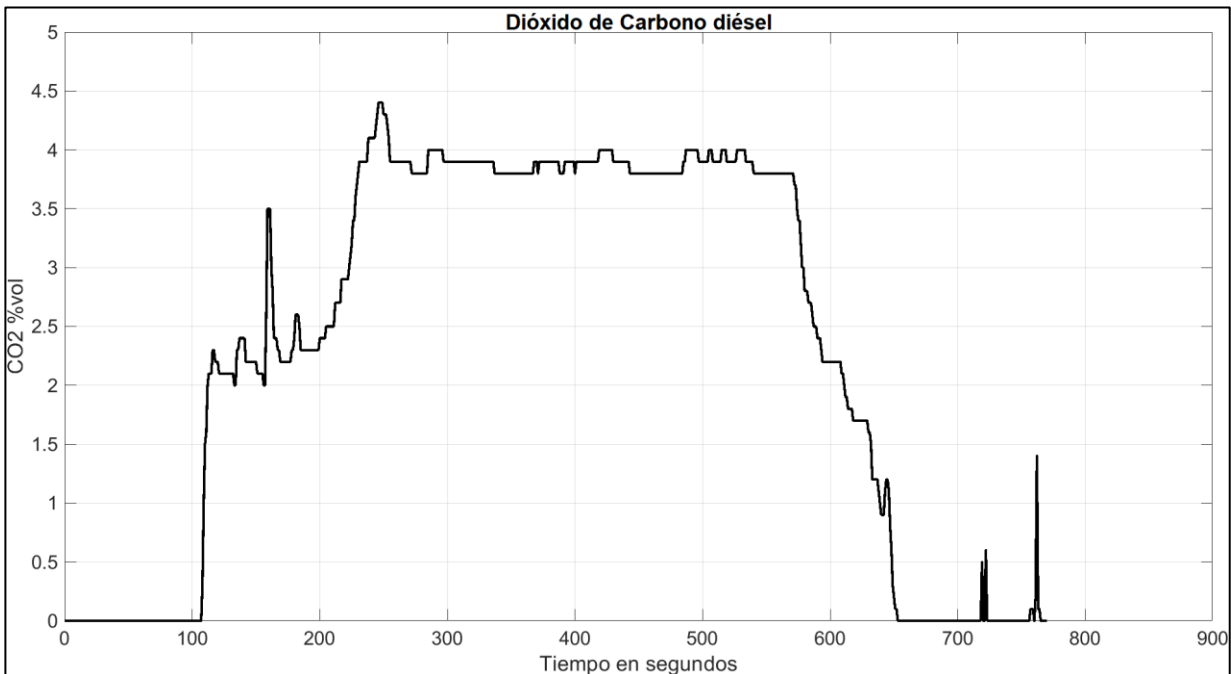


Figura 4.13 Lectura de dióxido de carbono presente en la primer prueba

Una vez que se han eliminado los datos nulos, se genera la línea de tendencia polinómica, que para este caso, es de 6to orden (Figura 4.14). La ecuación de dicha línea de tendencia es:

$$(4-3) \quad y = (1.166e^{-14}x^6) - (2.155e^{-11}x^5) + (1.475e^{-8}x^4) - (4.636e^{-6}x^3) + (0.0006372x^2) - (0.01984x) + (2.053)$$

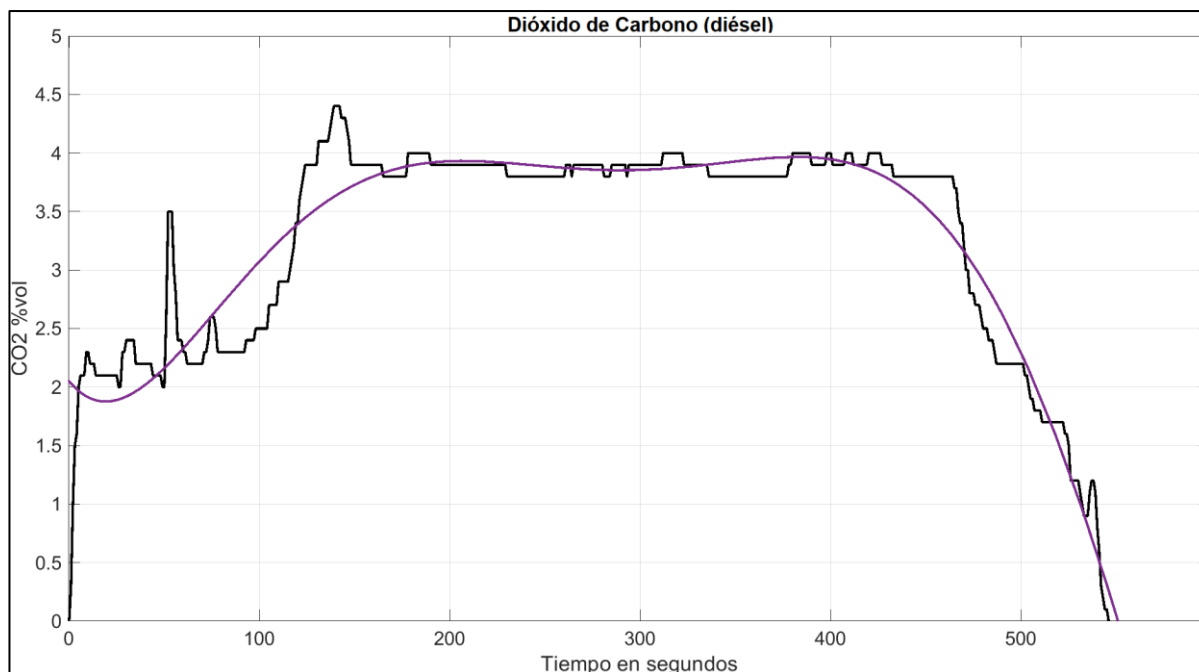


Figura 4.14 Comportamiento de la línea de tendencia polinómica de 6to orden sobre la lectura de datos del dióxido de carbono de la primer prueba

Al igual que en los casos anteriores, se calculó el área bajo la curva, con la ecuación (4-3) obtenida, desde cero hasta 546. El resultado del área calculada es:

$$A = 1,817 \text{ unidades}^2$$

b.2) SEGUNDA PRUEBA (BIODIÉSEL B10)

En la Figura 4.15 se aprecia la lectura de datos del dióxido de carbono emanado durante la segunda prueba. Al igual que en el caso anterior, se procede a eliminar los datos de desinterés, desde el segundo cero hasta 552 y desde 916 hasta 1037, se genera un segundo gráfico con la mejor línea de tendencia polinómica (6to orden, Figura 4.16) y se presenta su respectiva ecuación (4-4).

$$(4-4) \quad y = (1.367e^{-14}x^6) - (2.579e^{-11}x^5) + (1.57e^{-8}x^4) - (4.482e^{-6}x^3) + (0.0005849x^2) - (0.01717x) + (2.254)$$

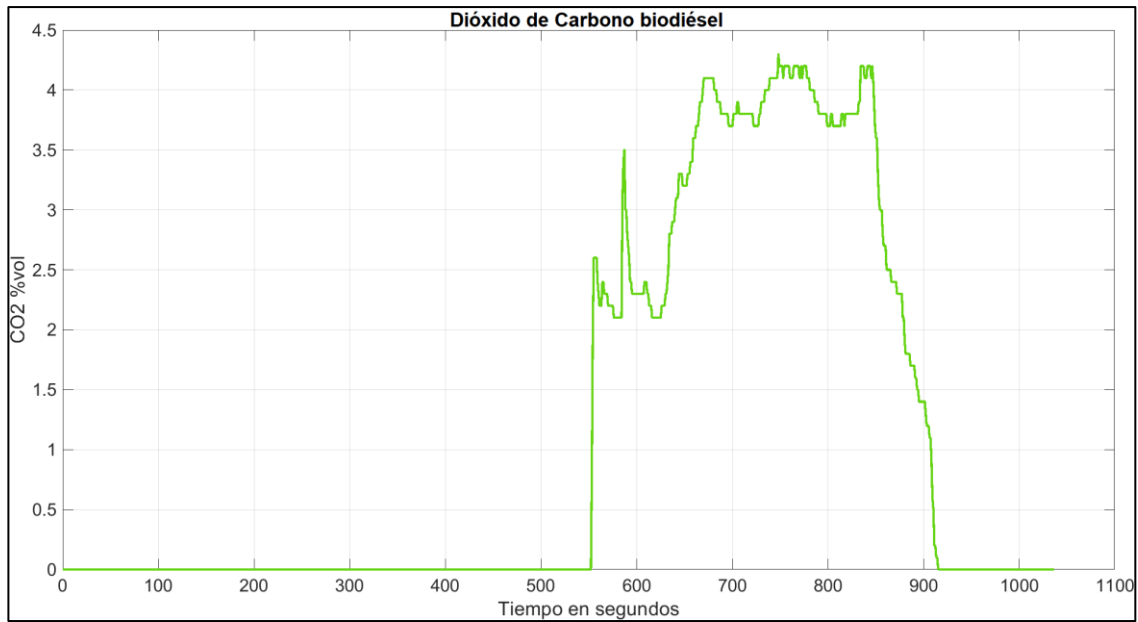


Figura 4.15 Lectura de dióxido de carbono presente en las emisiones de la segunda prueba

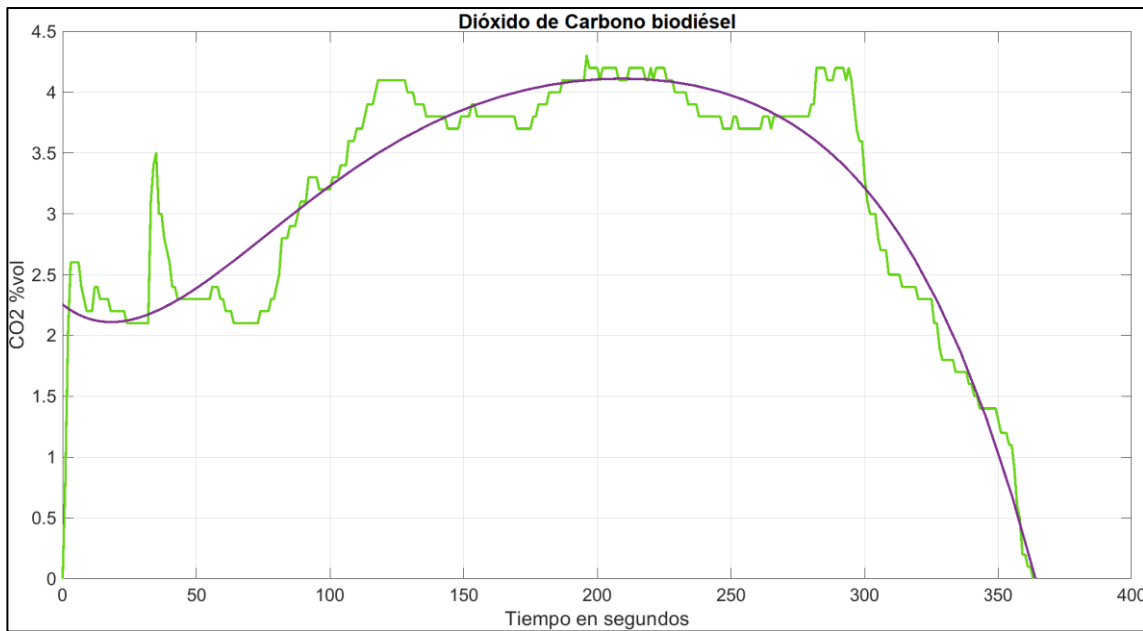


Figura 4.16 Comportamiento de la línea de tendencia polinómica de 6to orden sobre la lectura de datos del dióxido de carbono de la segunda prueba

Finalmente se toma la ecuación (4-4), con ella se calcula el área bajo la curva desde cero hasta 364 (la diferencia entre 916 y 552 segundos). El valor del área es:

$$A = 1,135.7 \text{ unidades}^2$$

Haciendo un análisis similar al que se hizo con el oxígeno, se puede determinar la cantidad de dióxido de carbono emitido por segundo en cada prueba. Para el caso de la primer prueba (combustible diésel), se tiene un valor de 3.33 CO₂ (%vol.) por segundo; y para la segunda prueba (biodiésel B10), de 3.12 CO₂ (%vol.) por segundo. Con el resultado anterior, se verifica que, con el uso de biodiésel, efectivamente, las emisiones de dióxido de carbono son menores. Podría parecer una diferencia muy pequeña, pero no hay que olvidar que si se usa en motores por tiempos muy prolongados, esta diferencia aumenta significativamente y crece aún más si se considera su uso en varios vehículos a la vez.

c) MONÓXIDO DE CARBONO (CO)

Las emisiones de monóxido de carbono, que se muestran en la Figura 4.17, de la primer prueba (combustible diésel) y las emisiones de monóxido de carbono, de la segunda prueba (biodiésel B10), mostradas en la Figura 4.18, son prácticamente nulas. Por esta razón, no se calculó ninguna línea de tendencia y, por consiguiente, ningún área. Con lo anterior, se puede asumir que prácticamente todo el monóxido de carbono se convirtió en dióxido de carbono.

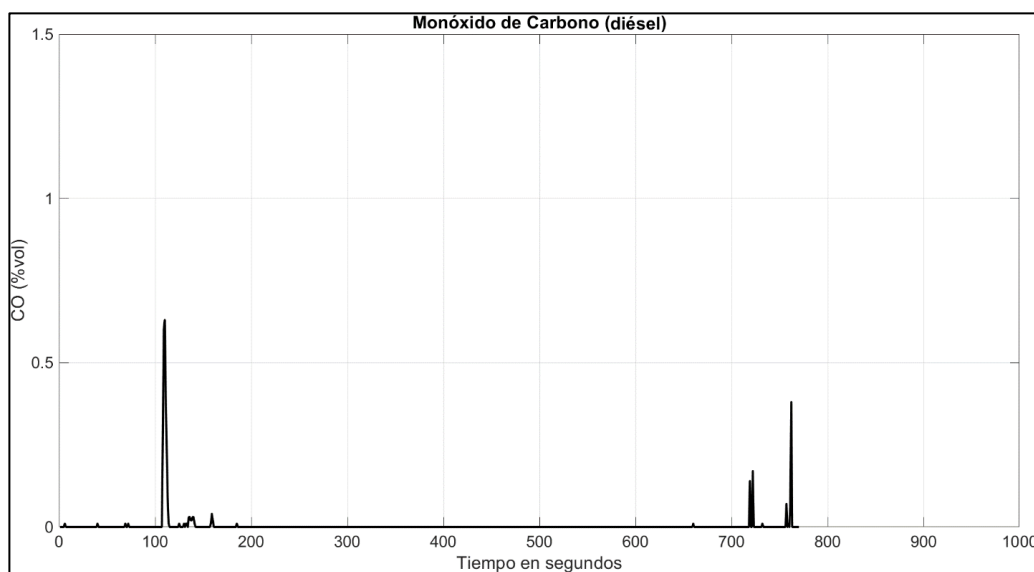


Figura 4.17 Lectura de monóxido de carbono presente en las emisiones de la primer prueba

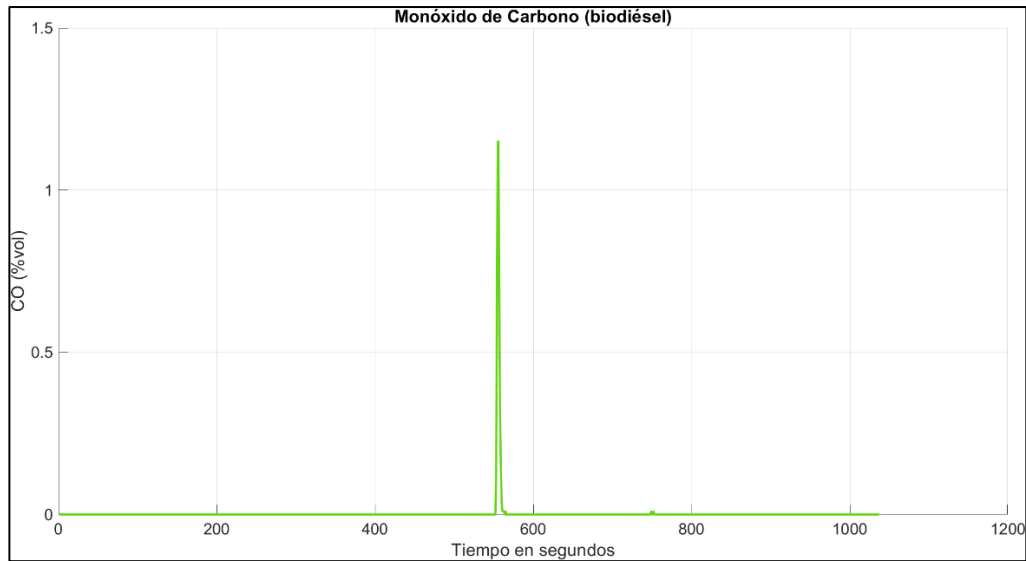


Figura 4.18 Lectura de monóxido de carbono presente en las emisiones de la segunda prueba

d) ÓXIDOS DE NITRÓGENO (NO_x)

d.1) PRIMER PRUEBA (COMBUSTIBLE DIÉSEL)

En la Figura 4.19, se muestra la lectura de óxidos de nitrógeno de la primer prueba. Siguiendo la misma metodología, se dejaron de lado los valores nulos, se trazó una nueva gráfica (desde cero hasta 548) y la línea de tendencia polinómica que mejor se adaptó fue la de 6to orden (Figura 4.20) con su respectiva ecuación (4-5).

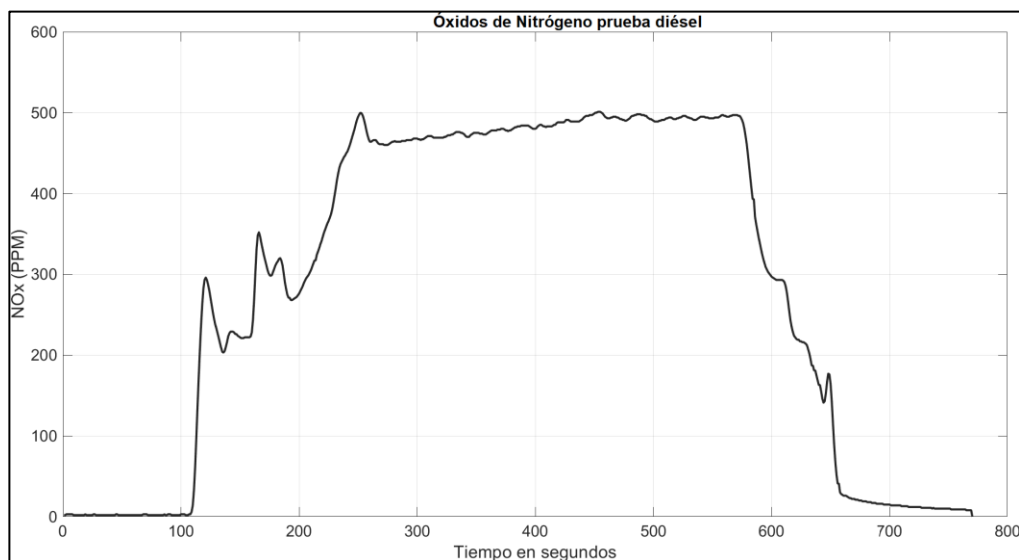


Figura 4.19 Lectura de óxidos de nitrógeno, en partes por millón, en la primer prueba

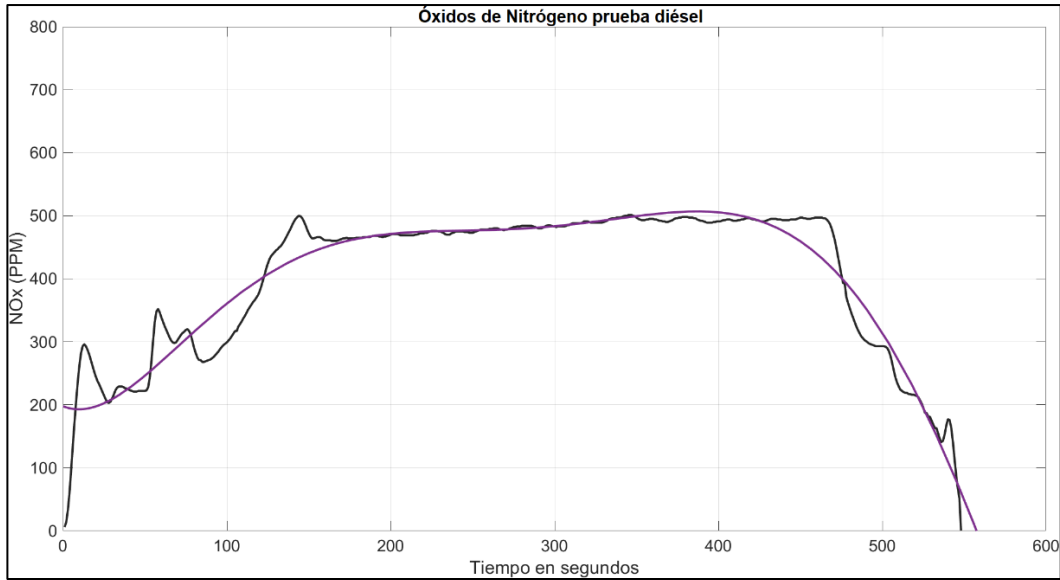


Figura 4.20 Comportamiento de la línea de tendencia polinómica de 6to orden sobre la lectura de datos de óxidos de nitrógeno de la primer prueba

La ecuación de la línea de tenencia (trazo morado), mostrada en la Figura 4.20, es la siguiente:

$$(4-5) \quad y = (1.173e^{-12}x^6) - (2.165e^{-9}x^5) + (1.467e^{-6}x^4) - (0.0004524x^3) + (0.05923x^2) - (1.032x) + (197.7)$$

Se calcula el área bajo la curva punteada desde cero hasta 548, el resultado es el siguiente:

$$A = 217,450 \text{ unidades}^2$$

d.2) SEGUNDA PRUEBA (BIODIÉSEL B10)

Para esta prueba, igual que en las anteriores, se eliminaron los valores nulos, se obtiene una nueva gráfica con su respectiva línea de tendencia polinómica (Figura 4.21) y su ecuación (4-6). De igual manera, ésta resulta ser de 6to orden y se presenta a continuación.

$$(4-6) \quad y = (7.486e^{-13}x^6) - (6.533e^{-10}x^5) + (1.555e^{-8}x^4) + (8.404e^{-5}x^3) - (0.02912x^2) + (5.472x) + (88.86)$$

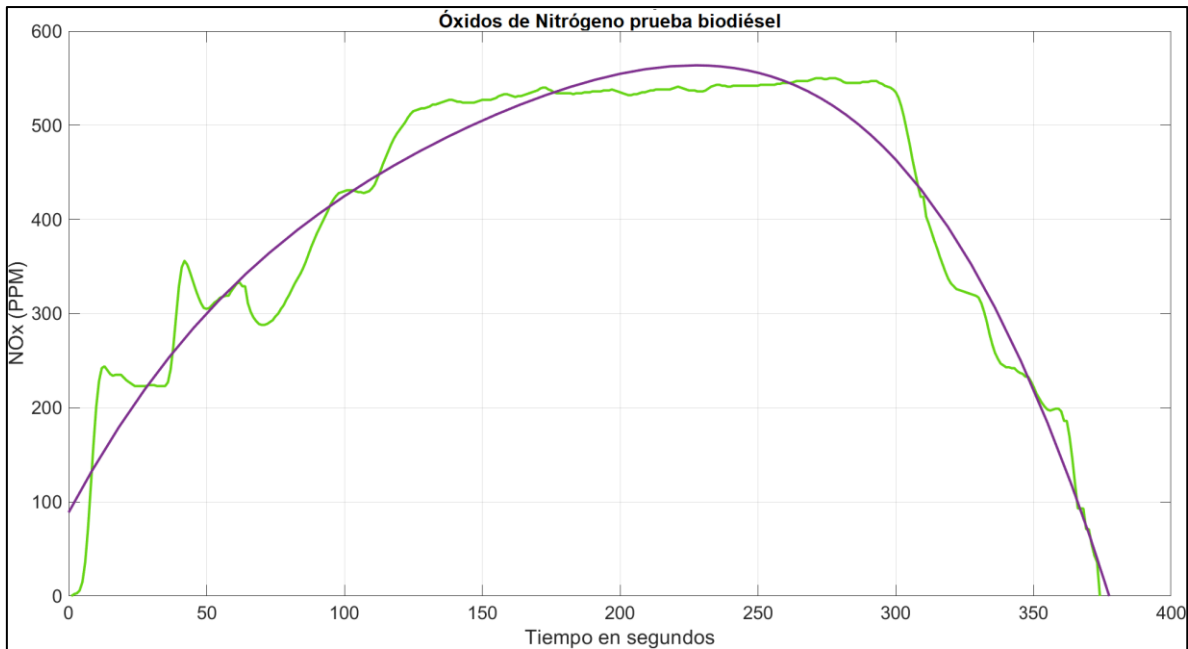


Figura 4.21 Comportamiento de la línea de tendencia polinómica de 6to orden sobre la lectura de datos de óxidos de nitrógeno de la segunda prueba

Se calcula el área bajo la curva desde cero hasta 374:

$$A = 153,440 \text{ unidades}^2$$

Realizando un análisis similar, como el del oxígeno y el dióxido de carbono, se corrobora que, efectivamente, el uso del biodiésel aumenta las emisiones de óxidos de nitrógeno en el escape. Para las pruebas anteriores, se tiene que para la primer prueba (combustible diésel) se generan cerca de 396.8066 NOx (PPM) por segundo, y para la segunda (biodiésel B10), 410.2674 NOx (PPM) por segundo.

e) HIDROCARBUROS NO QUEMADOS (HC)

Al igual que las emisiones de monóxido de carbono, las emisiones de hidrocarburos que se muestran en la Figura 4.22 y 4.23, de la primer prueba (combustible diésel) y de la segunda prueba (biodiésel B10), respectivamente, son prácticamente nulas. Por lo que no se calculó ninguna línea de tendencia y no hay un área qué calcular. Se puede asumir que, como no hubo emisiones de hidrocarburos, la combustión se realizó de manera completa y todo el combustible se quemó dentro de la cámara de combustión del motor.

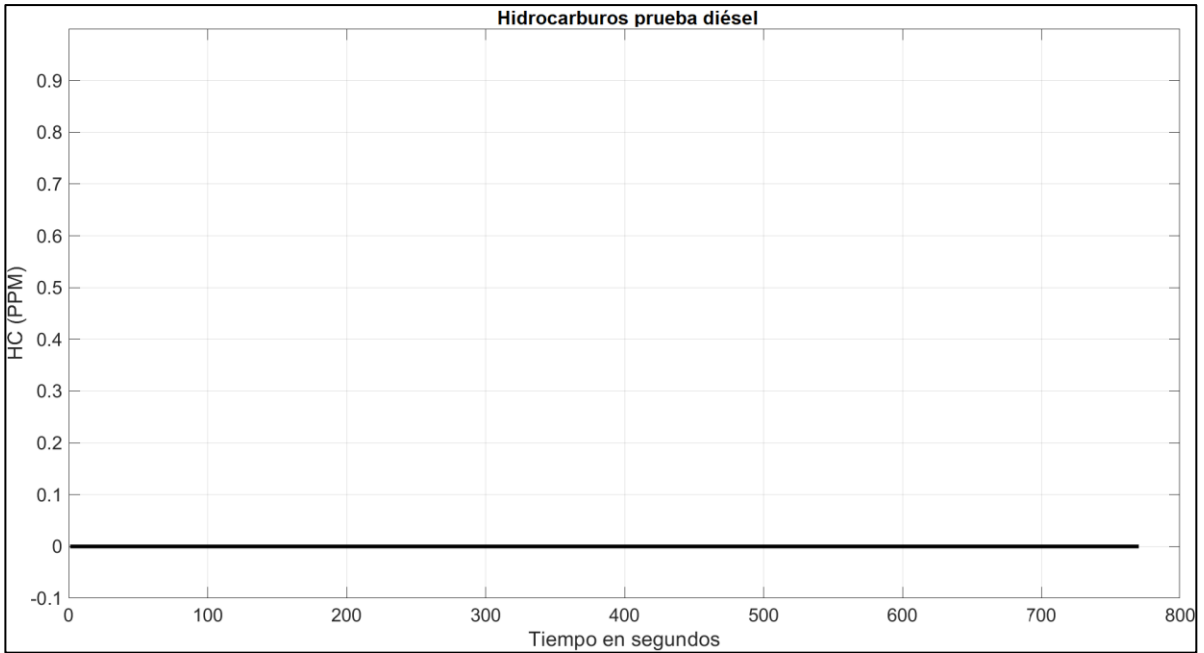


Figura 4.22 Lectura de hidrocarburos no quemados, presentes en la primer prueba, en partes por millón

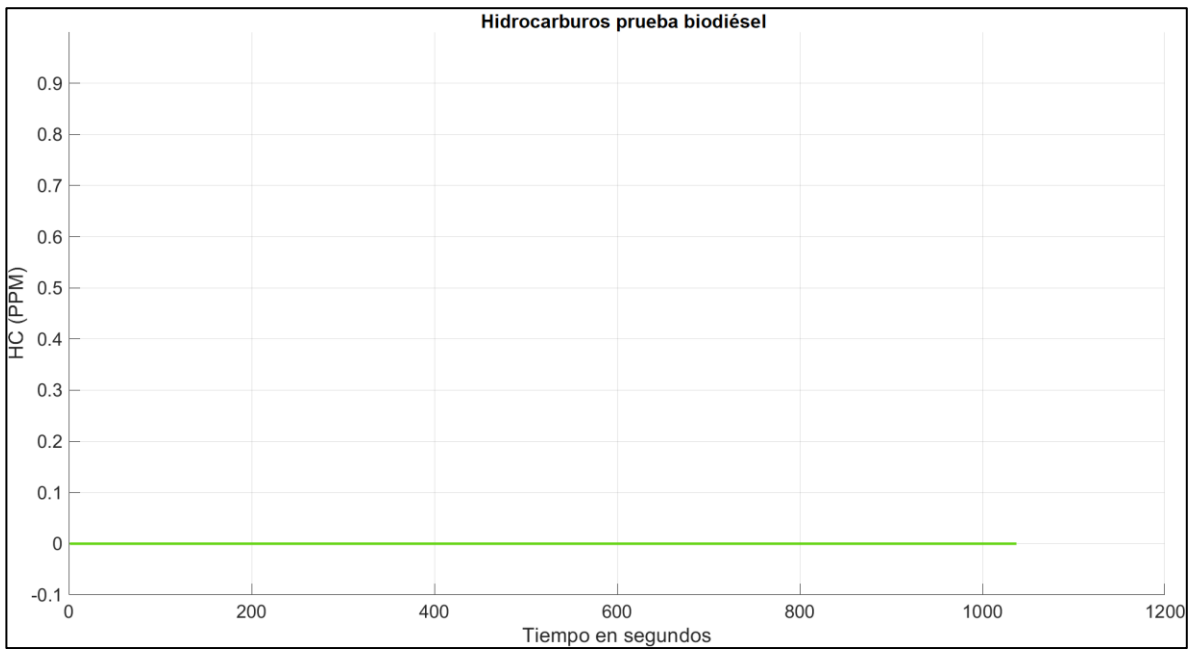


Figura 4.23 Lectura de hidrocarburos no quemados, presentes en la segunda prueba, en partes por millón

En la Tabla 4.6, que se muestra a continuación, se resumen los resultados obtenidos de las lecturas de emisiones contaminantes de ambas pruebas (combustible diésel y biodiésel B10).

Tabla 4.6 Resultados de las lecturas de emisiones contaminantes de las pruebas (combustible diésel y biodiésel B10)

Compuesto	Combustible	Valor máximo obtenido (pico)	Valor mínimo obtenido (pico)	Valor promedio	Ecuación de la línea de tendencia	Emisiones por segundo
O₂	Diésel	21.00 %vol.	14.40 %vol.	17.60 %vol.	6to orden	17.00 %vol./s
	Biodiésel	20.90 %vol.	15.10 %vol.	19.26 %vol.	7mo orden	19.28 %vol./s
CO₂	Diésel	4.40 %vol.	0.00 %vol.	3.26 %vol.	6to orden	3.33 %vol./s
	Biodiésel	4.20 %vol.	0.00 %vol.	3.12 %vol.	6to orden	3.12 %vol./s
CO	Diésel	0.63 %vol.	0.00 %vol.	0.00 %vol.	-	-
	Biodiésel	1.15 %vol.	0.00 %vol.	0.00 %vol.	-	-
NO_x	Diésel	499.00 PPM	0.00 PPM	403.41 PPM	6to orden	396.81 PPM/s
	Biodiésel	545.00 PPM	0.00 PPM	422.08 PPM	6to orden	410.27 PPM/s
HC	Diésel	0.00 PPM	0.00 PPM	0.00 PPM	-	-
	Biodiésel	0.00 PPM	0.00 PPM	0.00 PPM	-	-

4.5 ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación se realiza una comparativa, con otras investigaciones, de los resultados obtenidos, y mostrados en el subcapítulo 4.3 (Pruebas en el motor) y subcapítulo 4.4 (Operación del equipo de medición de emisiones y lectura de emisiones contaminantes).

El primer trabajo titulado *Análisis del desempeño de motores diésel operados con biodiésel*, elaborado por Vidal y col. (2012), se describe una prueba realizada el 1 de diciembre de 2011, en el mismo laboratorio y la misma máquina (laboratorio de máquinas térmicas de la UNAM, motor GMC 2150). En este trabajo se ponen a prueba 3 combustibles; 2 de ellos biodiésel B100 (IrBio y Bio-UV), producidos por el método de transesterificación y elaborados por diferentes dependencias; el último era diésel convencional (PEMEX).

El objetivo de la investigación de Vidal y col., fue el de analizar el desempeño termomecánico, usando los 3 diferentes combustibles. En la Tabla 4.7, se muestra la comparación de las eficiencias obtenidas de ambos trabajos de investigación.

Tabla 4.7 Comparativa de las eficiencias obtenidas

Combustibles	Eficiencias
Resultados de Vidal y col.	
IrBio	12.3%
Bio-UV	11.4%
Diésel	16.0%
Resultados del presente trabajo	
Primer prueba (combustible diésel)	17.01%
Segunda prueba (biodiésel B10)	15.96%

Comparando las eficiencias obtenidas en ambas pruebas, se puede observar lo siguiente: en el caso del combustible diésel, las eficiencias son muy cercanas, se podría decir que prácticamente son los mismos valores. Para el caso de los biocombustibles IrBio y Bio-UV, al ser utilizados al 100%, y mencionado anteriormente, es de esperarse que la eficiencia del motor disminuya debido a su menor poder calorífico. En el caso de la mezcla B10, la eficiencia es más alta comparada con los biocombustibles B100 (IrBio y Bio-UV), ya que no hay que olvidar que esta mezcla contiene 90% combustible diésel fósil y 10% biodiésel a base de aceite de soya. Al tener el diésel fósil mayor poder calorífico que el biocombustible y ser el más abundante en la mezcla B10, resulta

coherente que la eficiencia en el motor sea más alta, en comparación con el uso de 100% biodiésel.

De igual manera, Vidal y col. analizan los máximos valores obtenidos de gases contaminantes (CO_2 , CO y O_2) emitidos por los 3 combustibles que utilizaron. En la Tabla 4.8 se puede contrastar los valores máximos (pico) de gases contaminantes de la prueba de Vidal y col. con los del subcapítulo 4.4.

Tabla 4.8 Contraste de valores máximos obtenidos

Combustibles	CO_2 %vol.	O_2 %vol.	CO %vol.	NO_x (PPM)	HC (PPM)
Resultados de Vidal y col.					
IrBio	5.50	13.00	1.00	No medido	No medido
Bio-UV	5.50	11.50	1.00	No medido	No medido
Diésel	6.00	13.00	1.00	No medido	No medido
Resultados del presente trabajo					
Combustible diésel	4.40	21.00	0.63	499.00	0.00
Biodiésel B10	4.20	20.9	1.15	545.00	0.00

Vidal y col. utilizaron un analizador de gases Orsat, con este instrumento solo se puede tomar lectura de las emisiones de oxígeno (O_2), monóxido de carbono (CO) y dióxido de carbono (CO_2) de una muestra de gases. Por lo contrario, el analizador de gases F5000, descrito en el capítulo 3, subcapítulo 3.4, es más sofisticado, ya que, además de brindar lecturas de O_2 , CO y CO_2 , proporciona lecturas de hidrocarburos no quemados (HC) y óxidos de nitrógeno (NO_x) por segundo.

Analizando las emisiones de dióxido de carbono en ambas pruebas, las del biodiésel resultaron ser ligeramente menores comparadas con su respectivo combustible diésel. Asimismo, las emisiones de dióxido de carbono emitidas por los 3 diferentes biocombustibles, se observa lo siguiente: las emisiones de CO_2 emitidas por los biocombustibles B100 (IrBio y Bio-UV) son mayores que las de biodiésel B10. Lo

anterior resulta contradictorio, ya que, con el uso de biodiésel B100, las emisiones deben disminuir más que con el uso de una mezcla B10.

Se puede concluir que, con el uso del biodiésel, se disminuye la eficiencia en el motor al igual que las emisiones de dióxido de carbono al ambiente. En cuanto a los valores obtenidos de las emisiones, habría que replicar alguno de los 2 experimentos y usar el mismo analizador de gases, ya que estos operan de manera muy diferente, para realizar una comparación más exacta entre los valores.

El segundo trabajo denominado *Protocolo de ensayos con biodiésel, en dinamómetro de banco, simulando condiciones reales de un vehículo*, es un trabajo de tesis elaborado por Negrón y Vázquez (2012). En esta investigación, se propone realizar una comparativa de las emisiones entre 5 combustibles; 2 de ellos son: diésel PEMEX (bajo en azufre) y diésel PEMEX UBA (Ultra Bajo en Azufre); los 3 restantes son mezclas B5, B10 y B20. En este trabajo se utilizó un motor Mercedes Benz, modelo OM366LA (Figura 4.24), del año de 1992, cuyos datos de placa son los mostrados en la Tabla 4.9.

Tabla 4.9 Datos de placa del motor Mercedes Benz de 1992

Especificaciones del motor OM366LA	
Potencia nominal	170 HP @ 2600 RPM
Torque máximo	560 Nm @ 1400 a 1800 RPM
Velocidad de vacío	600 ± 50 RPM
Número de cilindros	6 en línea
Desplazamiento	5900 cm ³

Para realizar las mediciones de las emisiones contaminantes, Negrón y Vázquez hacen uso de un Sistema de Medición de Emisiones Portátil (PEMS), de marca AXION, el cual puede dar lecturas por segundo de gases contaminantes (CO, CO₂, HC y NO_x) y de material particulado (PM₁₀ y PM_{2.5}). En la Figura 4.25, se puede apreciar dicho equipo.



Figura 4.24 Motor Mercedes Benz, modelo OM366LA (Negrón y Vázquez, 2012)

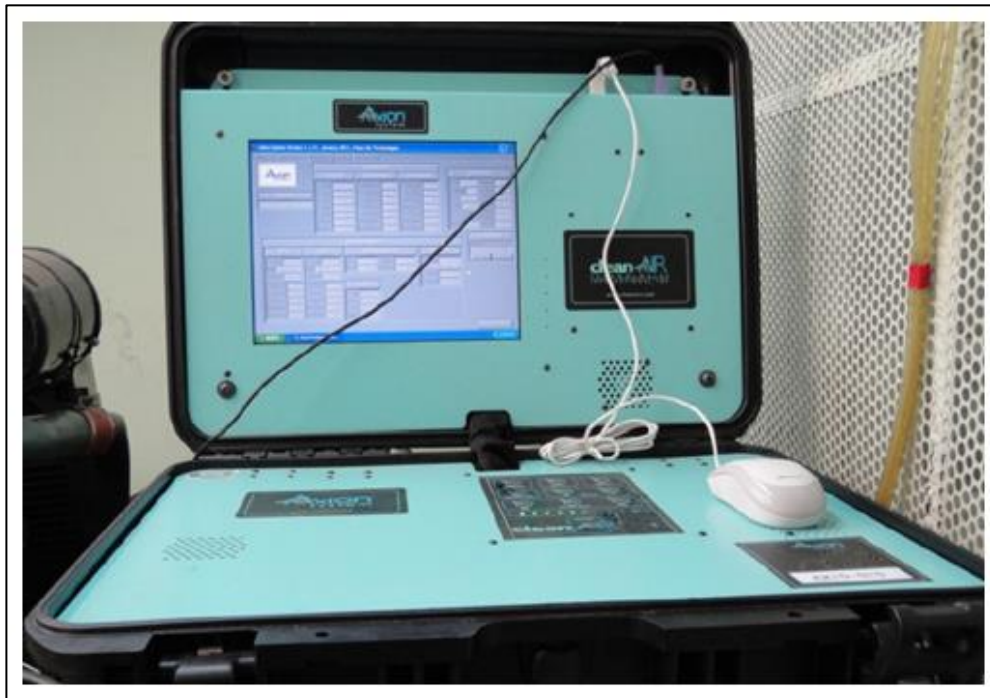


Figura 4.25 PEMS, de la marca AXION (Negrón y Vázquez, 2012)

A diferencia del equipo F5000, de E INSTRUMENTS, el analizador de gases AXION da lectura de los gases contaminantes en gramos por segundo (g/s) y, adicionalmente,

proporciona información acerca del material particulado. Por lo que se puede deducir que el equipo PEMS, de AXION, está mejor equipado que el F5000, de E INSTRUMENTS. En la Tabla 4.10 se muestran los resultados obtenidos por Negrón y Vázquez, de las emisiones contaminantes emanadas por sus 5 tipos de combustibles.

Tabla 4.10 Emisiones contaminantes emanadas por combustible

Combustible	CO ₂	CO	HC	NO _x	PM _{2.5}	PM ₁₀
Diésel PEMEX (bajo en azufre)	5.28 g/s	9.64 mg/s	7.49 mg/s	70.69 mg/s	0.38 mg/s	0.20 mg/s
Diésel PEMEX UBA	5.31 g/s	9.45 mg/s	9.60 mg/s	61.81 mg/s	0.39 mg/s	0.22 mg/s
Mezcla B5	4.09 g/s	7.17 mg/s	6.22 mg/s	51.86 mg/s	0.22 mg/s	0.22 mg/s
Mezcla B10	5.65 g/s	7.70 mg/s	9.36 mg/s	71.90 mg/s	0.47 mg/s	0.29 mg/s
Mezcla B20	4.56 g/s	7.70 mg/s	8.53 mg/s	57.79 mg/s	0.27 mg/s	0.25mg/s

Entre los resultados obtenidos por Negrón y Vázquez, y los datos que se obtuvieron en la Tabla 4.6, se puede mencionar lo siguiente:

- 1) Las emisiones de dióxido de carbono que obtuvieron Negrón y Vázquez en su trabajo son más bajas para las mezclas B5 y B20. En el caso de la mezcla B10, se puede observar que es la que tiene mayores emisiones, superando incluso a los combustibles de origen fósil. Por el contrario, el biodiésel B10 utilizado en el motor GMC Detroit 2150 proporciona resultados más alentadores al disminuir las emisiones de dicho contaminante.
- 2) En el caso del monóxido de carbono, Negrón y Vázquez demuestran que el uso del biodiésel ayuda a disminuir las emisiones de este contaminante. Los resultados que ellos obtienen, respecto a este compuesto, son más claros gracias al rango de lectura de su equipo. Para el caso del motor GMC Detroit 2150, no se aprecia un cambio en las emisiones del CO, puesto que éstas, tanto para la primer prueba (combustible diésel) como para la segunda prueba (biodiésel B10), prácticamente fueron nulas.

- 3) En el caso de las emisiones de hidrocarburos, se observa nuevamente que el equipo PEMS da muy buenas lecturas, que ayudan a realizar una buena comparación de los valores. A diferencia de las lecturas obtenidas por el F5000, donde se tiene la incertidumbre si existen emisiones de hidrocarburos o si los valores son tan bajos que el equipo no los detecta.
- 4) Mencionado con anterioridad, se espera que, con el uso del biodiésel, las emisiones de óxidos de nitrógeno aumenten; mientras más biocombustible en la mezcla, mayores serán las emisiones, es decir, una mezcla B20 tendería a emanar más NOx que una mezcla B5. Lo anterior no ocurre en los resultados de Negrón y Vázquez, ya que, como se puede apreciar en la Tabla 4.10, la mezcla B10 es la que registra mayores emisiones de NOx, cuando se espera que sea la mezcla B20. En el caso de la prueba realizada en el motor GMC, se observa que la mezcla B10 predomina con emisiones de NOx, como era de suponerse (ver Tabla 4.6).
- 5) Se ha comprobado que los motores diésel, además de emitir gases contaminantes, también emiten partículas sólidas invisibles al ojo humano. Está demostrado que estas partículas causan graves enfermedades respiratorias en los seres humanos. El F5000, de E INSTRUMENTS, no tiene la capacidad de dar lecturas de material particulado. Para enriquecer el análisis de emisiones, Negrón y Vázquez realizan la lectura de este material particulado. Se observa que la mezcla B10 emana la mayor cantidad de partículas PM2.5, seguida de diésel PEMEX y diésel PEMEX UBA. En el caso de las partículas PM10, se puede apreciar que, aunque la diferencia es mínima, las mezclas de biodiésel generan más partículas que los combustibles de origen fósil. Estas partículas son de especial cuidado, ya que son más pequeñas que las PM2.5 y pueden entrar con mayor facilidad a las vías respiratorias.

CONCLUSIONES

Se ha demostrado que la transesterificación es uno de los mejores métodos, tanto por ser económico como por su fácil empleo para la producción de biodiésel. Con este método, se logra obtener una muy buena calidad de este biocombustible. Desde el inicio, se logra una buena reacción entre la materia prima a utilizar y el alcohol, sin la necesidad de repetir el proceso varias ocasiones, ya que esto afectaría directamente en los costos de producción. Los parámetros evaluados del biodiésel, al finalizar el proceso de transesterificación, resultaron exitosos y cumplen con los rangos establecidos, como lo estipulan las normas internacionales. Con ello, se puede concluir que el proceso fue exitoso.

La primer prueba (combustible diésel) se realizó satisfactoriamente, ya que se llegó a una eficiencia aceptable, muy cercano a la estipulada por el laboratorio de máquinas térmicas de la Facultad de Ingeniería de la UNAM. Se menciona en la teoría que el poder calorífico del biodiésel es menor al del diésel, lo que supone una disminución en la potencia y eficiencia. Analizando los datos obtenidos, se puede observar que la eficiencia del motor GMC 2150, en la prueba con diésel fue de 17.0123%, mientras que la eficiencia usando biodiésel B10 fue de 15.9558%, disminuye 6.2% con el uso del biocombustible. Con esto se comprueba que, efectivamente, hay una disminución en la eficiencia del motor diésel.

No todas las mezclas reducen la emisión de partículas y de hidrocarburos. Se aprecia que el uso de 90% diésel con 10% biodiésel, promete ser una mezcla viable para los motores que operan con ciclo diésel, ya que sí disminuyen las emisiones de CO₂, además, el biodiésel no emite óxidos de azufre y las prestaciones mecánicas del motor no se ven afectadas significativamente.

La literatura menciona que, con el uso del biodiésel, sin importar la cantidad que se emplee, se reducen las emisiones de partículas, de monóxido de carbono, óxidos de azufre e hidrocarburos. Para esta investigación, la medición de partículas y óxidos de azufre no se pudo realizar debido a que el equipo F5000 carecía de estas funciones. En el caso del monóxido de carbono y de hidrocarburos, no se aprecia cambio alguno, por

lo que se podría sugerir el uso de un equipo más sensible y completo que proporcione las lecturas faltantes.

Para completar esta investigación, se recomendaría añadir otros rubros, como: medición de opacidad de los gases, realizar otras pruebas con diferentes mezclas (B5, B15, B20, etc.), variar el peso en el brazo de palanca del freno Froude, medir las emisiones de SOx y de partículas.

Por último, el uso de biocombustibles no es para aumentar las prestaciones de los motores de combustión interna, como muchas personas piensan. Como se ha comprobado, el uso de biocombustibles sirve para disminuir las emisiones de gases efecto invernadero, que dañan la salud de los seres humanos, a cambio de disminuir la eficiencia del motor.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agüero, H. 2013. Historia del automóvil; La invención de los motores a combustión interna. Publicación de Calaméo. Canarias, España.
- Ali, Y. y Hanna, M. 1994. Alternative diesel fuels from vegetables oils. Department of Biological Systems Engineering. University of Nebraska-Lincoln. Nebraska, EE.UU.
- Alleman, T., McCormick, R., Christensen, E., Fioroni, G. y Moriarty, K. 2016. Biodiesel Handling and Use Guide Fifth Edition. U.S. Department of Energy. Washington, D.C., EE.UU.
- Álvarez, B. 2019. Manual de procedimiento para la reparación general de las culatas cg204702n para los motores l7042, f3521, l5790, p9390 de tipo g/ gl/ gsi de la serie vhp de Waukesha. Facultad Tecnológica Ingeniería Mecánica. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia.
- Álvarez, C. 2009. Biocombustibles: Desarrollo histórico-tecnológico, mercados actuales y comercio internacional. Universidad Nacional Autónoma de México. Publicación del Posgrado de la Facultad de Ingeniería. Ciudad Universitaria, Ciudad de México, México.
- Agarwal, A. 1998. Vegetable oils versus diesel fuel: development and use of biodiesel in a compression ignition engine. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. 8(3): 191-204.
- Agarwal, A. 2007. Biofuels (alcohols and biodiesel) applications as fuels for internal combustion engines. *Progress in Energy and Combustion Science*. 33(3): 233-271.
- Arias-Paz, M. 2004. Manual de Automóviles. CIE Dossat 2000. Pág. 61 – 73. Madrid, España.
- ASTM, 2012a. ASTM D6751-12 Standard Specification for Biodiesel Fuel Blend Stock (B100) for Middle Distillate Fuels. Publication of American Society for Testing and Materials. EE.UU.
- ASTM D6751-20, 2020. Standard Specification for Biodiesel Fuel Blend Stock (B100) for Middle Distillate Fuels, ASTM International, West Conshohocken, Montgomery Pensilvania (PA), EE.UU.

- Beer, T., Grant, T., Williams, D., y Watson, H. 2002. Fuel-cycle greenhouse gas emissions from alternative fuels in Australian heavy vehicles. ***Atmospheric Environment***. 36(4): 753 - 763.
- Buitrón, G. 2014. Los biocombustibles. Publicación de *El Universal*. Querétaro, México
- Bünger, J., Krahl, J., Baum, K., Schröder, O., Müller, M., Westphal, G. y Hallier, E. 2000. Cytotoxic and mutagenic effects, particle size and concentration analysis of diesel engine emissions using biodiesel and petrol diesel as fuel. ***Archives of Toxicology***. 74(8): 490 - 498.
- CADECO. 2019. Bloque motor para equipo Caterpillar. Refacciones Monoblock. Nuevo León, México.
- CAN/CGSB-3.522-20, 2020. Diesel fuel containing biodiesel (B6-B20). Publication of the National Standard of Canada. Canadian General Standards Board. Quebec, Canadá.
- Carlucci, A., Cicconi Vidal, M. y Bregni, C. 2004. Las microemulsiones como vehículos para administración de drogas. Universidad de Buenos Aires. Buenos Aires, Argentina.
- Castellar, G., Angulo, E. y Cardozo, B. 2014. Transesterificación de aceites vegetales empleando catalizadores heterogéneos. Universidad Autónoma del Caribe y Universidad del Atlántico. Barranquilla, Colombia.
- Cavieres, P. 2008. Biocombustibles de Primera Generación. Publicación de Electro Industria. Providencia, Chile.
- Cengel, Y. y Boles, M. 2012. Termodinámica. Mc Graw Hill. Séptima Edición. Pág. 504 – 505. Ciudad de México, México.
- Cerdeira, S., Ceretti, H. y Reciulschi, E. Biodiésel. Publicación del ministerio de educación. Buenos Aires, Argentina.
- Cervantes, J. 2020. Estudio experimental del uso de diésel emulsificado en el rendimiento y contaminantes emitidos en un motor de encendido por compresión. Tesis de Maestría de Ingeniería Mecánica. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México, México.

- ChemSrc. 2021. Properties of Soybean oil. Shanghai Jizhi Biochemical Technology Co., Ltd & Baoji GuoKang Bio-Technology Co., Ltd. Baoji City, Shaanxi Province , China.
- Collymore, A., Arencibia, R., Blanco, A. y Araújo, J. 2008. Producción científica mundial sobre el biodiésel. **Revista Cubana de Ciencias de la Información en Salud (ACIMED)**. 5(18):1-19
- D'Amato, G., Liccardi, G., D'Amato, M. y Cazzola, M. 2002. Outdoor air pollution, climatic changes and allergic bronchial asthma. **European Respiratory Journal**. 20: 763 – 776.
- Draghi, L. y Filgueira, R. 2015. Motores Diésel: Ciclo ideal y diagrama indicado. Universidad Nacional de la Plata. Publicación de la Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. Buenos Aires, Argentina.
- Dufey, A. y Strange, D. 2011. Estudio regional sobre la economía de los biocombustibles en 2010: Temas clave para los países de América Latina y el Caribe. Pág. 19 – 21. Publicación de las Naciones Unidas, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). Santiago, Chile.
- E INSTRUMENTS. 2017. F5000 instruction & operation manual (version 1.01).
- EBB. 2020. About biodiesel. Publicación European biodiesel board. Bruselas, Bélgica.
- ECOFYS. 2016. Diagnóstico de la situación actual del biodiésel en México y escenarios para su aprovechamiento. Publicación de la Red Mexicana de Bioenergía (RMB). Morelia, Michoacán, México.
- EIA, 2020. Biofuels explained – Biomass based diesel fuels. U.S. Energy Information Administration. Washington, D.C., EE.UU.
- Espinosa, A. 2019. Modelado, recreación virtual en CATIA y renderizado en KeyShot del Webster Engine. Tesis de Licenciatura en Ingeniería Aeroespacial. Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad de Sevilla. Sevilla, España.
- Fedebiocombustibles. 2020. Información estadística del sector de biocombustibles. Bogotá, Colombia.
- Fernández, A. 2014. Biocombustibles de tercera generación. Eroski Consumer. Elorrio, España.

- Fernández, L. 2020. Ranking mundial de los principales países productores de biocombustibles en 2018. Publicación de Statista. España.
- Flores, Y. 2013. Análisis de la composición química del diésel y del biodiésel, y aplicación de técnicas multivariantes para determinar su origen. Tesis de Licenciatura de Ingeniería Química. Facultad de Química. Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad Universitaria, Ciudad de México, México.
- García, A. 2016. Historia de los biocombustibles, biodiésel. Curso. Facultad de Ciencias Químicas. Universidad Autónoma de Nuevo León. Monterrey, Nuevo León, México.
- Giacosa, D. 1968. Motores endotérmicos. Dossat, S.A. Pág. 72 – 73. Milán, Italia.
- Graboski, M., McCormick, R., Alleman, T., y Herring, A. 2003. The effect of biodiesel composition on engine emissions from a DDC series 60 diesel engine. National Renewable Energy Laboratory (*Report No: NREL/SR-510-31461*). Denver, Colorado, EE.UU.
- Gómez, A., Klose, W. y Rincón, S. 2008. Pirólisis de Biomasa. Publicación de la Universidad de Kassel y Universidad Nacional de Colombia. Kassel, Alemania y Bogotá, Colombia.
- Gualavisí, G. 2012. Estudio Automotriz – Partes Fijas de un motor de combustión Interna. Quito, Ecuador.
- IEA, 2020. Renewables 2020. International Energy Agency (IEA). París, Francia.
- IICA, 2010. Atlas de la agroenergía y los biocombustibles en las Américas: II Biodiésel. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, Programa Hemisférico en Agroenergía y Biocombustibles. Pág. 7 - 49, 157, 187, 241, 249, 297 - 313. San José, Costa Rica 2010.
- IICA., Torroba, A. 2020. Atlas de los biocombustibles líquidos 2019-2020. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA, 2020). Pág. 7 - 11, 15, 16, 22, 23, 25, 30 y 31. San José, Costa Rica 2020.
- INECC. 2020. Aceite de Semilla de Soya (Aceite de Soya). Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. Ciudad de México, México.

- Jaramillo, O. 2007. Ciclo Diésel. Notas del curso termodinámica para ingeniería. Centro de investigación en energía del Instituto de Energías Renovables. Universidad Nacional Autónoma de México. Temixco, Morelos, México.
- Kalligeros, S., Zannikos, F., Stournas, S., Lois, E., Anastopoulos, G., Teas, C., y Sakellaropoulos, F. 2003. An investigation of using biodiesel/marine diesel blends on the performance of a stationary diesel engine. ***Biomass and Bioenergy***. 24(2): 141-149.
- Kuusimaki, L., Peltonen, K., Mutanen, P. y Kirsti, S. 2003. Analysis of particle and vapour phase PAHs from personal air samples of bus garage workers exposed to diesel exhaust. ***Annals of Occupational Hygiene***. 47(5): 389 – 398.
- Lapinskiene, A., Martinkus, P., y Rėbždaitė, V. 2006. Eco-toxicological studies of diesel and biodiesel fuels in aerated soil. ***Environmental Pollution***. 142(3): 432 - 437.
- Laplace, 2013. Ciclo Diesel. Departamento de Física Aplicada III. Universidad de Sevilla. Sevilla, España.
- Lin, Y., Lee, W., y Hou, H. 2006. PAH emissions and energy efficiency of palm-biodiesel blends fueled on diesel generator. ***Atmospheric Environment***. 40(21): 3930 - 3940.
- Llanes, E., Rocha-Hoyos, J., Salazar, P., Medrano, J. 2017. Producción e Impacto del Biodiésel: Una Revisión. ***INNOVA Research Journal***. 2(7): 59 – 76.
- Loctite Teroson. 2018. Pros y contras del biodiésel respecto al diésel y la gasolina. Henkel Ibérica El blog de los profesionales del taller. Barcelona, España.
- Long, P. 2002. The Rev. W. Cecil's hydrogen engine. Department of Engineering. University of Cambridge. Cambridge, Reino Unido.
- Martínez, A. 2007. Motores de Combustión Interna. Treball de recerca. Publicación del Instituto Baix Montseny. Sant Celoni, Barcelona, España.
- Meyers, W., Meyer, S., Binfield, J., y Ziolkowska, J. 2010. Targets and Mandates: Lessons Learned from EU and US Biofuels Policy Mechanisms. ***AgBioForum***. 13(4): 398 - 412.
- Mishra, P. 2017. Diesel Cycle – Process with P-V and T-S Diagram. Mechanical Booster. California, EE.UU.

- Mofijur, M., Masjuki, H. H., Kalam, M. A., Rasul, M. G., Atabani, A. E., Hazrat, M. A., & Mahmudul, H. 2015. Effect of biodiesel-diesel blending on physico-chemical properties of biodiesel produced from *Moringa oleifera*. *Procedia Engineering*. (105): 665 - 669.
- Naciones Unidas. 2006. Consecuencias normativas, comerciales y de desarrollo. Conferencia de las Naciones Unidas sobre comercio y desarrollo. Pág. 7 - 17. Nueva York y Ginebra, Estados Unidos y Suiza.
- Navarro, E. 2011. Biotecnología de microalgas. Producción de biodiésel. Universidad de Almería. Almería, España.
- Negrón, J. y Vázquez, F. 2012. Protocolo de ensayos con biodiésel en dinamómetro de banco simulando condiciones reales de un vehículo. Tesis de Licenciatura de Ingeniería Mecánica. Facultad Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México, México.
- NOM-016-CRE-2016. 2016. Norma Oficial Mexicana NOM-016-CRE-2016, que establece las especificaciones de calidad de los petrolíferos. Diario Oficial de la Federación, Secretaria de Gobernación.
- NOM-041-SEMARNAT-2015. 2015. Norma Oficial Mexicana NOM-041-SEMARNAT-2015, que establece los límites máximos permisibles de emisión de gases contaminantes provenientes del escape de los vehículos automotores en circulación que usan gasolina como combustible. Diario Oficial de la Federación, Secretaria de Gobernación. Ciudad de México, México.
- NOM-042-SEMARNAT-2003. 2003. Norma Oficial Mexicana NOM-042-SEMARNAT-2003, que establece los límites máximos permisibles de emisión de hidrocarburos totales o no metano, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno y partículas provenientes del escape de los vehículos automotores nuevos cuyo peso bruto vehicular no exceda los 3,857 kilogramos, que usan gasolina, gas licuado de petróleo, gas natural y diésel, así como de las emisiones de hidrocarburos evaporativos provenientes del sistema de combustible de dichos vehículos. Diario Oficial de la Federación, Secretaria de Gobernación. Ciudad de México, México.
- NOM-044-SEMARNAT-2006. 2006. Norma Oficial Mexicana NOM-044-SEMARNAT-2006, que establece los límites máximos permisibles de emisión de

hidrocarburos totales, hidrocarburos no metano, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, partículas y opacidad de humo provenientes del escape de motores nuevos que usan diésel como combustible y que se utilizaran para la propulsión de vehículos automotores nuevos con peso bruto vehicular mayor de 3,857 kilogramos, así como para unidades nuevas con peso bruto vehicular mayor a 3,857 kilogramos equipadas con este tipo de motores. Diario Oficial de la Federación, Secretaria de Gobernación. Ciudad de México, México.

- NOM-045-SEMARNAT-1996. 1996. Norma Oficial Mexicana NOM-045-SEMARNAT-1996, que establece los niveles máximos permisibles de opacidad del humo proveniente del escape de vehículos automotores en circulación que usan diésel o mezclas que incluyan diésel como combustible. Diario Oficial de la Federación, Secretaria de Gobernación. Ciudad de México, México.
- NOM-047-SEMARNAT-2014. 2014. Norma Oficial Mexicana NOM-047-SEMARNAT-2014, que establece las características del equipo y el procedimiento de medición para la verificación de los límites de emisión de contaminantes, provenientes de los vehículos automotores en circulación que usan gasolina, gas licuado de petróleo, gas natural u otros combustibles alternos. Diario Oficial de la Federación, Secretaria de Gobernación. Ciudad de México, México.
- OCDE/FAO. 2017. Biocombustibles, en OCDE-FAO Perspectivas Agrícolas 2017-2026. Publicación de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE). París, Francia.
- Ogunkunle, O. y Ahmed N. 2019. A review of global current scenario of biodiesel adoption and combustion in vehicular diesel engines. *Energy Reports*. (5)1: 1560-1579.
- Pasqualino, J., Montane, D., y Salvado, J. 2006. Synergic effects of biodiesel in the biodegradability of fossil-derived fuels. *Biomass and bioenergy*. 30(10) 874 - 879.
- PEMEX DIESEL. 2016. Hoja de datos de seguridad. Pemex diésel (Versión 6). Ciudad de México, México.
- Perihan, S. y Zeki, Y. 2011. Application of energy and exergy analyses to a CI engine using biodiesel fuel. Publication of Karabük University & Bozok University. Karabük, Turquía.

- Peterson, C., Reece, D., Cruz, R. y Thompson, J. 1992. A comparison of ethyl and methyl esters of vegetable oil as diesel fuel substitute. Liquid-fuels from renewable resources. Alternative Energy Conference, American Society of Agricultural Engineers, pp. 99 - 110.
- Pisarello, M. 2010. Producción de biodiésel: equilibrio fisicoquímico y cinética de esterificación y transesterificación con diferentes catalizadores y alcoholes. Tesis de doctorado de Ingeniería Química. Facultad de Ingeniería Química, Universidad Nacional del Litoral. Santa Fe, Argentina.
- Planas, O. 2010. Diferencias entre el ciclo diésel real y teórico. Publicación de DEMOTOR. Barcelona, España.
- Planas, O. 2018. Ventajas del motor Diésel. Publicación de DEMOTOR. Barcelona, España.
- Plamenov, R. 2011. Design a four cylinder Internal Combustion Engine. Project and Engineering Department. Universidad Pública de Navarra. Pamplona, España.
- Pulido, O. 2020. Motor Diesel. Tesis de Licenciatura de Ingeniería Mecánica Electricista. Facultad de Estudios Superiores "Cuautitlán", Universidad Nacional Autónoma de México. Cuautitlán, Estado de México, México.
- Quiyono, O. 2020. ¿Cuáles son las ventajas y desventajas del motor diésel?. Publicación de "Ubícalo". León, Guanajuato, México.
- RODES. 2017. El diésel o gasoil: todo lo que deberías saber. Red Operativa de Desguaces Españoles. Valencia, España.
- SAGARPA. 2017a. Impulsa SAGARPA producción de biocombustibles en México. Comunicado de Secretaria de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). Ciudad de México, México.
- SAGARPA. 2017b. Las oleaginosas que más se producen en México. Comunicado de Secretaria de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). Ciudad de México, México.
- Salinas, E, y Gasca, V. 2009. Los biocombustibles. El Cotidiano #157. Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco. Azcapotzalco, Ciudad de México, México.

- Sandoval, M. 1984. Esterificación de ácidos grasos con resinas de intercambio iónico. Tesis de licenciatura de Ingeniería Química. Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad Universitaria, Ciudad de México, México.
- Scott, J. y Alpízar, G. 2017. Poderes calóricos de algunos combustibles. Refinadora Costarricense de Petróleo (RECOPE). San José, Costa Rica.
- Secretaria de Salud (SS). 2015. Normas Oficiales Mexicanas. Gobierno de México. Ciudad de México, México.
- Sheehan, D., Lecrubier, Y. y Sheehan, K. 1998. The mini-international neuropsychiatric interview: 995 The development and validation of a structured diagnostic psychiatric interview for DSM-IV and ICD-10. ***The Journal of Clinical Psychiatry***. 59(20), 22–33.
- Siegel, I., Yaghoubzadeh, E., Keskey, T., y Gleicher, N. 1987. Cytotoxic effects of free fatty acids on ascites tumor cells. ***JNCI: Journal of the National Cancer Institute***. 78(2), 271-277.
- Sosa, L. 2018. Instalación de un laboratorio dedicado a la determinación de la calidad del biodiésel. Tesis de licenciatura de Ingeniería Química. Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad Universitaria, México, Cd. Mx, México.
- Tiseo, I. 2020. Leading biodiesel producers worldwide in 2019, by country. Statista. EE.UU.
- UE, 2019. Normas europeas. Publicación de la Unión Europea (UE). Europa.
- Ultrilla, D. 2020. Partes de un motor. Espacio coches by Tendencias. Madrid, España.
- USCG. 1999. Chemical Hazard Response Information System (CHRIS) - Hazardous Chemical Data. Commandant Instruction 16465.12. United States Coast Guard (USCG). Washington, D.C., EE.UU.
- Valderrama, D. 2007. Mercado Internacional de Biocombustibles. Publicación de la Universidad Autónoma de Madrid. Madrid, España.
- VALEO. 2016. Kit4P conversion kit. Transmission Systems. Francia, Pág. 8.

- Van Gerpen, J. 2019. Biodiesel Production Principles and Processes. National Institute of Food and Agriculture. Energy Farm. University of Idaho. Idaho, EE.UU.
- Vidal, A., Rodríguez, A., Vega de la Garza, A. y Rodríguez, E. 2012. Análisis del desempeño de motores diésel operados con biodiésel. ***Academia Journals***. (4):1-6.
- Villafán, S. 2019. Biodiésel, ¿Una alternativa viable al diésel?. Tesis de Licenciatura en Ciencias Ambientales. Escuela Nacional de Estudios Superiores, Unidad Morelia. Universidad Nacional Autónoma de México. Morelia, Michoacán, México.