



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Análisis experimental de la utilización de biocombustibles en un
generador convencional Perkins.*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Mario Martín Moreno

DIRECTORES: Antón Cacabelos Reyes
Carlos Pérez Collazo
André Boheman

CURSO ACADÉMICO: 2023-2024

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

Análisis experimental de la utilización de biocombustibles en un generador convencional Perkins.

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Cuerpo General / Infantería de Marina

Universida_{de}Vigo

RESUMEN

Los biocombustibles son una fuente de energía alternativa a los combustibles tradicionales utilizando tecnología ya existente, acabando con la dependencia del petróleo sin suponer una gran inversión. El biodiésel es un biocombustible cuyo uso supone una emisión neta de carbono cercana a la neutra, siendo 100 % biodegradable y compatible con los motores actuales. Procede de ácidos grasos vegetales que, mediante un proceso de transesterificación se transforma en biodiésel.

En el presente TFG se realiza un análisis experimental de la utilización de biodiésel en un grupo electrógeno formado por un motor Perkins y un generador eléctrico. Se han realizado ensayos haciendo funcionar el grupo con biodiésel en diferentes proporciones y a diferentes cargas, comprobando cómo afectaban estos parámetros sobre el consumo de combustible y nivel de emisiones. Para esto se le ha diseñado y construido un sistema de alimentación de combustible alternativo y una instalación eléctrica para conectar un conjunto de resistencias. Posteriormente, se han propuesto medidas para reducir la emisión de óxidos de nitrógeno y probado una de ellas. Finalmente, se ha valorado la viabilidad de la utilización de biodiésel en motores actuales y cuáles son las condiciones que debe cumplir el mismo para alcanzarla con éxito.

PALABRAS CLAVE

Motor diésel, Biodiésel, Diésel generador, NOx, Biocombustibles.

AGRADECIMIENTOS

A mi familia, que es la que siempre ha estado, está y estará. A mis compañeros de estudio y de vida por la ayuda prestada. Finalmente, a mi novia Nerea por ser un apoyo en todos los aspectos de mi vida.

CONTENIDO

Contenido	1
Índice de Figuras	4
Índice de Tablas.....	6
1 Introducción y objetivos	7
1.1 Objetivos	7
1.2 Estructura del documento.....	8
2 Estado del arte	9
2.1 Transición ecológica y combustibles alternativos.	9
2.1.1 Mercado energético y dependencia de combustibles fósiles.	9
2.1.2 Evolución en normativa.....	10
2.1.3 Combustibles alternativos.....	11
2.2 El biodiésel.....	12
2.2.1 Reseña histórica	12
2.2.2 Especificaciones	12
2.2.3 Comparativa de normativas.	13
2.2.4 Obtención.....	13
2.2.5 Ventajas y desventajas de utilizar biodiésel	14
2.2.6 Conservación y almacenaje	15
2.2.7 Rendimiento y utilización.....	16
2.2.8 Producción nacional. Cuota de mercado.....	17
2.2.9 Precio de mercado. Viabilidad.....	17
2.3 El motor diésel	18
2.3.1 Reseña histórica	18
2.3.2 Funcionamiento	18
2.3.3 Tipos de Inyección de combustible	19
2.3.4 Emisiones producidas	20
2.4 Efectos del uso del biodiésel en motores diésel.....	23
2.4.1 NOx “térmico”.....	23
2.4.2 NOx por calibración	24
2.4.3 Medidas para reducir la emisión de NOx	25
3 Desarrollo del TFG.....	26
3.1 Banco de ensayos	26
3.1.1 Grupo electrógeno Monzón	27
3.1.1.1 Motor Perkins	27

3.1.1.1	Generador Stamford.....	29
3.1.1.2	Controlador del equipo electrógeno SAM 716.....	29
3.1.2	Medidor Testo 340.....	30
3.1.3	Medidor de caudal Testo 405i	31
3.1.4	Depósito de combustible con balanza.....	31
3.1.5	Conjunto de resistencias	33
3.2	Combustibles.....	36
3.3	Realización de los ensayos.....	37
3.3.1	Medición de emisiones.	37
3.3.2	Cálculo de consumos.	38
4	Resultados.	39
4.1	Consumo de combustible	39
4.1.1	Consumo sin carga.....	40
4.1.2	Consumo con carga baja.....	41
4.1.3	Consumo con carga media.....	41
4.1.4	Consumo comparado	42
4.2	Emisiones	42
4.2.1	Emisiones para B0.	43
4.2.2	Emisiones para B10.	43
4.2.3	Emisiones para B20.	43
4.2.4	Emisiones para B40.	44
4.2.5	Emisiones para B60.	44
4.2.6	Comparativo T ^a gases de escape.....	44
4.2.7	Comparativo porcentaje de O ₂	45
4.2.8	Comparativo porcentaje CO ₂	46
4.2.9	Comparativo nivel de NO.....	46
4.2.10	Comparativo nivel de NO _x	47
4.3	Medidas para corregir el aumento de NO/NO _x	48
4.3.1	B40 con 4kW y restricciones de aire de admisión.....	48
4.3.1.1	Comparativo temperatura gases de escape (°C).....	48
4.3.1.2	Comparativo cantidad de O ₂	49
4.3.1.3	Comparativo cantidad de CO ₂	49
4.3.1.4	Comparativo nivel de NO	50
4.3.1.5	Comparativo nivel de NO _x	50
4.3.2	B40 con 8 kW y restricciones de aire de admisión.....	51
4.3.2.1	Comparativo temperatura de gases de escape (°C).....	51

4.3.2.2 Comparativo cantidad de O ₂	52
4.3.2.3 Comparativo cantidad de CO ₂	52
4.3.2.4 Comparativo nivel de NO	53
4.3.2.5 Comparativo nivel de NO _x	53
5 Discusión de los resultados.	54
5.1 Consumo de combustible	54
5.2 Emisiones	55
5.2.1 Temperatura de gases de escape	55
5.2.2 Emisiones de CO ₂	55
5.2.3 Emisiones NO/NO _x	55
5.2.4 Ensayos con restricción de aire de admisión	56
5.3 Limitaciones	56
6 Conclusiones y líneas futuras	58
6.1 Conclusiones	58
6.2 Propuestas de mejora	59
6.3 Líneas futuras	60
Bibliografía.....	61
Anexo I: Implicaciones Sociales, y/o Económicas, y/o Ambientales	63
Anexo II: Reflexiones Éticas y Sociales	64
Anexo III: Normativa europea y americana de estándares de calidad para biodiésel.	65
Anexo IV: Esquema eléctrico del conjunto de resistencias.....	67
Anexo V: Ficha especificaciones de diseño Repsol e+ Neotech.....	68
Anexo VI: Ficha especificaciones biodiésel BioOils	69

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1: Aumento de la temperatura media mundial según varios modelos de predicción [2]...	10
Figura 2-2: Reacción de transesterificación para la producción de biodiésel [7].....	14
Figura 2-3: Gráfico de variación de la viscosidad de diferentes tipos de biodiésel con la temperatura [15].....	17
Figura 2-4: Variación del precio de los combustibles desde febrero de 2018 [18].....	18
Figura 2-5: Vista exterior (a) y seccionada (b) de una bomba de inyección en línea diésel.	19
Figura 2-7: Vista superior de un motor con tecnología TDI.	20
Figura 2-8: Niveles de contaminantes permitidos por cada normativa Euro [20].....	21
Figura 2-9: Componentes de un sistema SCR [21].	23
Figura 2-10: Generación de NO según la temperatura y ángulo del cigüeñal [24].....	24
Figura 3-1: Vista general del motor Perkins (autoría propia).	28
Figura 3-2: Generador Stanford (a) y conexión con grupo de resistencias (b) (autoría propia).	29
Figura 3-3: Controlador SAM conectado a un ordenador (autoría propia).	29
Figura 3-4: Agujero para medición de emisiones con tapón (a) y sonda (b) (autoría propia).	30
Figura 3-5: Medidor de caudal Testo en conducto de admisión (a) y App con datos (b) (autoría propia).	31
Figura 3-6: Depósito auxiliar de combustible con balanza digital para medición de consumos (autoría propia).....	32
Figura 3-7: Detalle del sistema de alimentación de combustible auxiliar (autoría propia).....	32
Figura 3-8: Detalle de filtros de combustible para los dos circuitos de alimentación (autoría propia).	33
Figura 3-9: Esquema eléctrico de la instalación del conjunto de resistencias (autoría propia).....	34
Figura 3-10: Instalación eléctrica para el conexionado de resistencias (autoría propia).....	34
Figura 3-11: Cuadro eléctrico de control (a) y detalle de conexión de selector, bombillas y pulsador de seguridad (b) (autoría propia).....	35
Figura 3-12: Conjunto de resistencias con termostato y presostato (a) y vista general (b) (autoría propia).	36
Figura 3-13: Indicación de proporción de biocombustible en surtidores de gasolinera (autoría propia).	37
Figura 4-1: Comparativa de ensayos de repetición de consumo de combustible.....	40
Figura 4-2 Consumo de combustible del generador trabajando sin carga para las diferentes mezclas.	40
Figura 4-3: Consumo de combustible del generador trabajando a baja carga para las diferentes mezclas.	41
Figura 4-4: Consumo de combustible del generador trabajando a media carga para las diferentes mezclas.	41
Figura 4-5: Consumo de combustible del generador trabajando a diferentes cargas y para las diferentes mezclas.	42

Figura 4-6: Comparativa T ^a gases para diferentes mezclas.....	45
Figura 4-7: Comparativa de cantidad de oxígeno para diferentes mezclas.....	45
Figura 4-8: Comparativa de cantidad de dióxido de carbono para diferentes mezclas.....	46
Figura 4-9: Comparativa de nivel de NO para diferentes mezclas.....	47
Figura 4-10: Comparativa de nivel de NO _x para diferentes mezclas.....	47
Figura 4-11: Comparativo temperatura de gases de escape para diferentes restricciones de aire de admisión.....	48
Figura 4-12: Comparativo cantidad de O ₂ para diferentes restricciones.....	49
Figura 4-13: Comparativo cantidad de CO ₂ para diferentes restricciones.....	49
Figura 4-14: Comparativo nivel de NO para diferentes restricciones.....	50
Figura 4-15: Comparativo nivel de NO _x para diferentes restricciones.....	50
Figura 4-16: Comparativo temperatura de gases de escape para diferentes restricciones de aire de admisión.....	51
Figura 4-17: Comparativo cantidad de O ₂ para diferentes restricciones de aire de admisión.....	52
Figura 4-18: Comparativo cantidad de CO ₂ para diferentes restricciones de aire de admisión.....	52
Figura 4-19: Comparativo nivel de NO para diferentes restricciones de aire de admisión.....	53
Figura 4-20: Comparativo nivel de NO _x para diferentes restricciones de aire de admisión.....	53

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1: Valores máximos de contaminante en cada normativa “Euro”.	11
Tabla 2-2: Comparativa normativa europea y americana en cuanto a etiquetado del biodiésel.	13
Tabla 2-3: Características exigidas por normativa para diésel y biodiésel.	13
Tabla 2-4. Ventajas de la utilización de biodiésel [7], [12].	15
Tabla 2-5: Desventajas de la utilización de biodiésel [7], [12].	15
Tabla 2-6: Elementos añadidos al motor diésel para cumplir normativa de homologación europea [20, p. 6].	20
Tabla 2-7: Número de estudios y resultados obtenidos para diferentes valores de rendimiento al utilizar biodiésel en motores diésel convencionales [13].	23
Tabla 3-1: Características del motor Perkins utilizado.	27
Tabla 3-2: Tipos de combustibles utilizables en el motor Perkins.	28
Tabla 3-3: Medidas registradas con el medidor Testo 340.	30
Tabla 3-4: Comparativa características de gasóleo tradicional y biodiésel.	37
Tabla 3-5. Proporción de biodiésel utilizado con nomenclatura.	37
Tabla 3-6: Esquema de tiempos en ensayo.	38
Tabla 4-1: Ensayos de repetición de consumo de combustible.	39
Tabla 4-2: Emisiones de gases contaminantes para B0.	43
Tabla 4-3: Emisiones de gases contaminantes para B10.	43
Tabla 4-4: Emisiones de gases contaminantes para B20.	43
Tabla 4-5: Emisiones de gases contaminantes para B40.	44
Tabla 4-6: Emisiones de gases contaminantes para B60.	44
Tabla 4-7: Comparativa T ^a gases para diferentes mezclas.	44
Tabla 4-8: Comparativa de cantidad de oxígeno para diferentes mezclas.	45
Tabla 4-9: Comparativa de cantidad de dióxido de carbono para diferentes mezclas.	46
Tabla 4-10: Comparativa de nivel de NO para diferentes mezclas.	46
Tabla 4-11: Comparativa de nivel de NOx para diferentes mezclas.	47
Tabla 4-12: Emisiones del generador trabajando a baja carga y con B40 para distintas restricciones de caudal.	48
Tabla 4-13: Emisiones del generador trabajando a media carga y con B40 para distintas restricciones de caudal.	51

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

El biodiésel es un biocombustible que utiliza aceites vegetales como materia prima, y es por eso por lo que se considera como uno de los combustibles “limpios”. Su producción se disparó en los años 80, cuando se empezó a investigar sus aplicaciones y como futuro sustituto al diésel procedente del petróleo. Más adelante y con la llegada de acuerdos medioambientales y de emisiones se ha ido incentivando su uso progresivamente hasta el día de hoy, en el que ya existen empresas logísticas cuyos vehículos se mueven gracias a este combustible.

La utilización del biodiesel como combustible alternativo presenta una serie de retos y desafíos para las empresas y usuarios que deseen utilizarlo en sus vehículos, ya que requiere de una serie de adaptaciones tanto en los motores como en la cadena logística para suministrarlo. El presente trabajo estudiará sus efectos en un motor convencional Perkins atmosférico de inyección indirecta y bomba convencional de inyección. Dicho motor está acoplado a un generador eléctrico por lo que en el experimento se podrá variar la carga o demanda de par al motor y observaremos qué efectos tiene en emisiones de gases contaminantes, consumo de combustible y rendimiento del motor.

Para ello, haremos funcionar el motor con diésel tradicional y biodiesel a distintas cargas y con distintas proporciones para posteriormente medir las diferencias que existen en consumo de combustible y variaciones en la emisión de gases contaminantes tales como: dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO) y óxidos de nitrógeno (NO). Gracias a los resultados podremos determinar la viabilidad de la conversión de este y el resto de motores diésel para ser utilizado con biodiésel o de las modificaciones necesarias para llevar esto a cabo.

El biodiesel tiene aparejado una serie de ventajas como son la reducción de la tasa de emisión neta de carbono a valores cercanos a 0, la utilización de un combustible no fósil y la reducción en las emisiones de partículas sólidas y de CO_2 . Es perfectamente miscible con el diésel convencional por lo que se puede estudiar qué proporción es la ideal para cada tipo de motor o uso y adaptarse así a las necesidades del usuario. Por el contrario, presenta una serie de inconvenientes como son su poca resistencia al almacenaje (de ahí que sea biodegradable), a la oxidación o a las bajas temperaturas. Puntualmente también presenta problemas con los filtros convencionales de combustible por su mayor viscosidad y densidad. Esto son problemas menores en comparación con la gran cantidad de beneficios que presenta el uso del biodiésel.

1.1 Objetivos

El objetivo principal del presente trabajo es el de analizar el desempeño de un generador diésel Perkins trabajando con biodiésel en diferentes proporciones y sometido a diferentes cargas.

Para llevar a cabo esto, se deberán realizar los siguientes hitos:

- Medir y comparar la cantidad de CO₂, CO, NO y NO_x emitido por el motor en funcionamiento con diferentes cargas y utilizando cada mezcla de biocombustible.
- Medir el consumo del generador para cada proporción de biodiésel y para diferentes cargas.
- Dilucidar la razón o razones por las cuales hay una variación en la cantidad de gases contaminantes emitidos.

Y a estos se le han añadido los siguientes objetivos:

- Proponer y ejecutar alguna(s) medida(s) para reducir algún valor que se dispare a la hora de utilizar mezclas con alto contenido en biodiésel.
- Observar problemas debidos al almacenaje del biodiesel y proponer soluciones para los mismos, así como posibles adaptaciones que habría que hacer a un motor para que funcione con él.
- Estudiar la viabilidad en la utilización de biodiesel como combustible alternativo en motores convencionales diésel, así como en qué proporción.

1.2 Estructura del documento

El presente documento se estructura de la siguiente manera:

Una primera parte que sirve de introducción en la que se detalla de forma breve en qué ha consistido el trabajo, los objetivos del mismo y cómo se ha estructurado. Una segunda parte de estado del arte en la que se ha realizado una revisión de trabajos similares y que sirve como base y nociones básicas para poder realizar el presente trabajo. Una tercera parte de desarrollo en la que se describirá la metodología utilizada en las pruebas y ensayos realizados, su organización y material disponible para la realización de estos. La cuarta parte presentará de forma ordenada y detallada los resultados obtenidos en todos los ensayos y pruebas realizadas. La quinta parte de discusión detallará cómo se encuadran los resultados obtenidos en el anterior punto dentro del estado del arte del segundo punto y el sexto y último punto describirá las conclusiones a las que se han llegado tras la realización del trabajo.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Transición ecológica y combustibles alternativos.

2.1.1 Mercado energético y dependencia de combustibles fósiles.

Desde la revolución industrial de 1765 en Inglaterra en la que el carbón fue el principal protagonista, los combustibles fósiles han estado presentes en las sucesivas revoluciones industriales. Desde la Revolución del gas de 1870 hasta la del 1969 debido a la energía nuclear. Esto ha hecho que la industrialización de los países y del mundo que conocemos hoy en día esté basado en la utilización de combustibles fósiles (o no renovables) para la generación de energía [1].

El consumo de combustibles fósiles, aunque ha sido parcialmente sustituido por formas más “limpias” de energía sigue aumentando, alcanzando máximos históricos año tras año. El consumo masivo de dichos combustibles ha generado dos tipos de preocupaciones diferentes.

Por una parte, y siendo puramente pragmáticos, se ha valorado la opción de que las reservas de combustibles fósiles como el petróleo o el gas natural se acabasen. Existen diversos modelos matemáticos que predicen el consumo mundial de una manera casi fidedigna teniendo en cuenta muchas variantes, pero ningún modelo ha sido capaz de predecir la cantidad exacta de petróleo o gas natural que queda [1].

La segunda mayor preocupación es sobre el impacto en el medio ambiente que van a tener la emisión de los gases resultantes de la quema de los combustibles fósiles. Especialmente los que contribuyan al cambio climático y favorezcan el efecto invernadero. Desde la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo de 1992 en Río de Janeiro esta preocupación se ha visto acrecentada y ratificada numerosas veces, alcanzando su máxima expresión con el Protocolo de Kioto, basado en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) y que entró en vigor en 2005 [1].

Esta convención, así como la COP (Conferencia de las Partes) y el acuerdo de París de 2015 acordaron un valor límite de 2° C para el aumento de la temperatura global del planeta a finales del siglo XXI. En la *Figura 2-1* se puede ver el aumento de la temperatura global desde la era preindustrial y la predicción de este aumento según diferentes modelos.

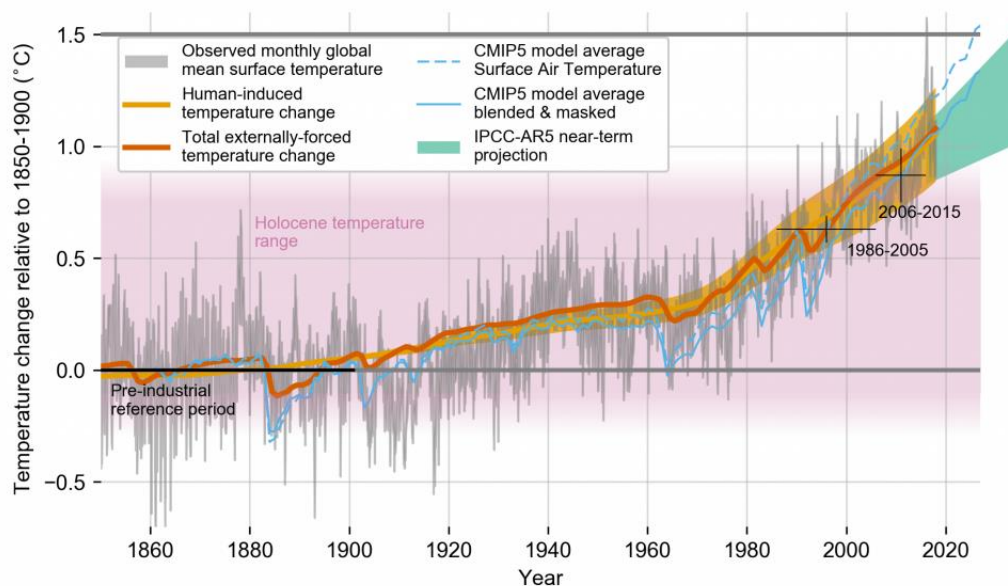


Figura 2-1: Aumento de la temperatura media mundial según varios modelos de predicción [2].

Actualmente y desde la publicación de la RED III (Renewable Energy Directive) en 2023 se insta a los países miembros a que al menos el 42% del total de combustibles consumidos por los estados miembros sean renovables para 2030, y del 60% para 2035. Esta directiva europea también prohíbe que se utilicen los cultivos que puedan suponer una competencia para el sector alimentario (incluyendo animal) en la producción de biocombustibles. Esto podría suponer la exclusión de los aceites vegetales más adecuados como el de palma o girasol, aunque no excluiría el de colza ni los residuos de los anteriores.

En concreto y para el sector transporte, esta directiva daba dos alternativas a los países:

- Establecer una cuota mínima del 29% de energías renovables en los vehículos para el año 2030.
- Reducir la emisión de gases de efecto invernadero un 14,5% para el año 2030 [3].

2.1.2 Evolución en normativa

En la Unión Europea (UE) la preocupación por el imparable aumento en la emisión de gases contaminantes tampoco es algo nuevo. Esta preocupación dio como resultado la normativa europea sobre emisiones contaminantes, comúnmente conocida como leyes “Euro”. La Euro 1 data de 1992 y cada sucesora de esta restringía los niveles de gases y partículas emitidas a niveles cada vez menores como se puede ver en la *Tabla 2-1*. Esta normativa es aplicable a cualquier vehículo que se venda nuevo en la UE. Gracias a esta normativa y a sus cada vez más exigentes requisitos, así como la modernización de los procesos industriales, la emisión de CO₂ y otros gases contaminantes se está reduciendo año a año [3].

Por otro lado, los grupos electrógenos deben cumplir la *Directiva de Emisiones para Máquinas Móviles no de Carretera (MMNC) EU 2016/1628* sobre los niveles máximos de contaminantes que deben emitir estas máquinas. Esta norma exige valores máximos según la potencia del grupo electrógeno, así como el combustible con el que funciona [4].

Norma	Entrada en Vigor	CO (g/km)	HCT (g/km)	NMHC	HCT + NOx (g/km)	NOx (g/km)	PM (g/km)
Euro 1	01/07/92	2,72	-	-	0,97	-	0,14
Euro 2	01/01/96	1,0	-	-	0,7	-	0,08
Euro 3	01/01/00	0,64	-	-	0,56	0,5	0,05
Euro 4	01/01/05	0,5	-	-	0,3	0,25	0,025
Euro 5	01/09/09	0,5	-	-	0,23	0,18	0,005
Euro 6	01/09/14	0,5	-	-	0,17	0,08	0,005

Tabla 2-1: Valores máximos de contaminante en cada normativa “Euro”.

2.1.3 Combustibles alternativos

La “batalla” contra el calentamiento global, y en concreto contra el efecto invernadero nos ha hecho llegar a la utilización de métodos de obtención de energía más respetuosos con el medio ambiente o, directamente, renovables. Entre los primeros se intentan buscar combustibles (como el biodiésel) con una huella de carbono cercana a la neutra y que procedan de fuentes renovables.

La huella de carbono o balance neto de carbono es la relación que existe entre el carbono producido y consumido en un proceso. En el caso que nos ocupa, diversos estudios sostienen que el balance neto de carbono es neutro [5], [6], ligeramente superior o inferior a cero [7], [8], [9]. Esto quiere decir que si sumamos la cantidad de carbono (CO₂) absorbida por un campo de cultivo determinado capaz de generar el biocombustible suficiente para mover una determinada flota de vehículos durante un tiempo determinado, y sumamos la cantidad de CO₂ emitida en los gases de escape de la misma flota y en el mismo tiempo, el resultado debería ser próximo a 0.

Realizar un análisis de emisiones netas de carbono requiere de una cantidad ingente de variables y circunstancias que hacen que los resultados de estos estudios normalmente varíen según quién los realice, cuántas de estas variables tenga en cuenta, y qué se haya propuesto demostrar, por lo que no se deberá elegir un estudio solo de forma vinculante.

La huella de carbono no es el único motivo por el cual se lleva investigando con biocombustibles un tiempo. Como se explicará más adelante, estos combustibles utilizan aceites vegetales como materia prima para su producción, entre otros compuestos. El aumento en la demanda de aceites vegetales tiene un efecto positivo sobre la economía, en especial el sector primario y en ámbitos rurales, los cuales han sufrido recesiones en los últimos años. El valor de tierras poco útiles o con una baja rentabilidad puede subir gracias al uso de estos combustibles, lo que supondría un impulso a la agricultura de los países productores [5].

Al igual que el número de ventajas, los biocombustibles siguen teniendo hoy en día un gran número de inconvenientes por los que no han tenido el éxito esperado en un principio. Las tecnologías tan avanzadas en motores que utilizan combustibles tradicionales suponen una barrera de entrada para la inversión de los fabricantes en una nueva tecnología. Adicionalmente y como se verá más adelante, el precio de producción de los biocombustibles sigue siendo bastante mayor que el de los combustibles fósiles, por lo que sin subvenciones sigue siendo un producto más costoso en comparación a su alternativa tradicional. Se necesitan grandes áreas de cultivo para producir una pequeña cantidad de combustible. Si quisiéramos satisfacer la demanda de combustible que se consume en España con una

alternativa “bio”, la extensión del campo de cultivo necesaria sería de un tercio del territorio nacional [5].

Los dos biocombustibles más utilizados en el mundo son el biodiésel y el bioetanol. El primero se tratará en un apartado siguiente. El bioetanol se utiliza como combustible alternativo en motores de ciclo Otto con ligeras modificaciones. Se produce a partir de zumos fermentados de cereales como maíz, o de plantas como la caña de azúcar o remolacha. Es ampliamente utilizado en países en los que estos cultivos abundan y que han sabido aprovechar la ventaja económica que este biocombustible ofrece. Brasil y Estados Unidos tienen las mayores flotas de vehículos que utilizan este combustible, con cuotas de mercado superiores al 80% en el primero. Este combustible es consumido en su mayoría por vehículos FFV (*Flexible Fuel Vehicle*) capaces de funcionar con gasolina y con etanol en proporciones muy altas [5].

2.2 El biodiesel

El biodiésel es un combustible biodegradable y renovable procedente de grasas animales o aceites vegetales y formado por ésteres metílicos. Para poder ser utilizado como combustible, el biodiesel debe tener una calidad y características parecidas a la del diésel convencional. Esto se debe a la cantidad de ingeniería y optimizaciones de diseño que tienen los motores de hoy en día (diésel y gasolina). Intentar crear uno desde cero que funcionase de una manera diferente a estos dos y que no tuviese una clara ventaja económica o medioambiental es un esfuerzo que ninguna marca quiere realizar [10].

2.2.1 Reseña histórica

Desde los comienzos del desarrollo del motor diésel ya se pensaba en la utilización de aceites vegetales como combustible. El primer motor de ciclo diésel, diseñado por Rudolf Diesel data de 1909, y fue él mismo el que en 1912 sostuvo que “el uso de los aceites vegetales como combustible en el motor puede parecer insignificante hoy, pero tales aceites pueden convertirse, con el curso del tiempo, en algo tan importante como el petróleo” [11].

El aceite vegetal presentaba una serie de inconvenientes que hicieron que se dejasen de utilizar como combustible en los motores diésel. Al estar formados principalmente por hidrocarburos saturados (triglicéridos) tienen una viscosidad mucho mayor (de hasta diez veces) que un gasóleo. Esto hace necesario la transformación de los aceites vegetales en biocombustible en un proceso llamado transesterificación [7].

2.2.2 Especificaciones

El biodiésel se utiliza comúnmente mezclado con diésel procedente del petróleo. Ambos combustibles no tienen problemas de miscibilidad, y se utiliza la nomenclatura BXX, donde las cifras siguiendo a la “B” representan la proporción de biodiésel presente en el combustible, siendo B100 la nomenclatura para el biodiesel puro. La “*American Society for Testing and Materials*” (ASTM) clasifica el biodiesel como D6751, mientras que a nivel europeo el Centro Europeo de Normalización CEN ha clasificado el combustible como EN 14214. Las dos organizaciones de normalización tienen diferentes escritos normativos según la proporción de la mezcla final del combustible, mostrándose en la *Tabla 2-2* [10].

La norma europea es más estricta con respecto a la calidad del biodiesel, ya que marca valores límites para monoglicéridos, diglicéridos y triglicéridos, así como cantidades de agua y sedimentos más bajas que la ASTM americana [5]. El conjunto de características que debe cumplir el biodiésel según ambas normas viene representado en el Anexo I.

<u>USA (ASTM)</u>			<u>EU (CEN)</u>		
Mezcla	Norma		Mezcla	Norma	
< B5	D 975	(Sin notificar al consumidor)	< B7	EN 590	(Sin notificar al consumidor)
B6 – B20	D 7467	(Indicando al consumidor que tiene biodiésel y su proporción)	B10	EN 16734	
			B20/30	EN 16709	
B100	D 6751		B100	EN 14214	

Tabla 2-2: Comparativa normativa europea y americana en cuanto a etiquetado del biodiésel.

La norma europea es más estricta con respecto a la calidad del biodiesel, ya que marca valores límites para monoglicéridos, diglicéridos y triglicéridos, así como cantidades de agua y sedimentos más bajas que la ASTM americana [5]. El conjunto de características que debe cumplir el biodiésel según ambas normas está representado en el Anexo I.

2.2.3 Comparativa de normativas.

La diferencia sustancial en composición del biodiésel y del diésel tradicional hace que se regule por normativas diferentes. Para una mayor compatibilidad en uso del biodiésel la normativa EN 14214 ha querido acercar las exigencias a las de la normativa EN 590 del gasóleo tipo A de automoción. Prueba de ello es que los valores de número de cetano, viscosidad y otras características son parecidas en ambas normativas.

Propiedad	Diésel EN 590	Biodiésel EN 14214
Número de cetano	49 (min)	51 (min)
Densidad a 15 °C (kg/m ³)	820-860	860-900
Punto de inflamación (°C)	55 (min)	101 (min)
Cantidad de agua (mg/kg)	200 (max)	500 (max)
Viscosidad a 40 °C (mm ² /s)	1,9-6	3,5-5

Tabla 2-3: Características exigidas por normativa para diésel y biodiésel.

2.2.4 Obtención.

Para la obtención de biodiésel se utilizan distintos aceites vegetales como materia prima dependiendo del área geográfica donde nos encontremos. Los aceites vegetales más utilizados para la producción de biodiésel son los de colza, ricino, girasol o soja, siendo el primero el más común en Europa. En todos ellos encontramos el problema de la viscosidad para su utilización como combustible, por lo que deben ser tratados según los siguientes métodos:

- Mezcla directa con gasóleo.
- Microemulsiones (sustituyen al diésel nº 2).
- Craqueo térmico (pirólisis).
- Transesterificación.

El último de los procesos nombrado (transesterificación) es el más utilizado actualmente debido a su facilidad de procesado, bajo coste energético en su producción en comparación a otros procesos (craqueo térmico) y buena calidad en el combustible resultante.

La transesterificación es el proceso de intercambio del grupo orgánico R de un éster con el grupo orgánico R de un alcohol. Para la obtención del biodiésel se utilizan aceites vegetales como materia prima y algún catalizador para acelerar la reacción como pueden ser el hidróxido de sodio o de potasio. Para el proceso también se utiliza etanol o metanol, así como glicerol y agua. El control de las cantidades de alcohol y catalizador son claves para que la reacción se lleve a cabo correctamente. La reacción está representada en la *Figura 2-2*.

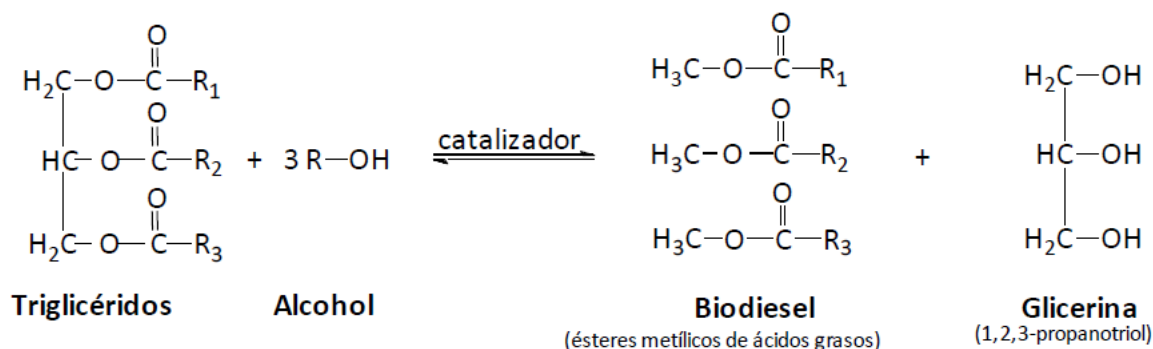


Figura 2-2: Reacción de transesterificación para la producción de biodiésel [7].

Como resultado final obtenemos un biocombustible de viscosidad similar o ligeramente inferior al diésel tradicional válido para ser utilizado en motores de ciclo diésel [7].

2.2.5 Ventajas y desventajas de utilizar biodiésel

Hay una gran cantidad de ventajas de las que nos podemos beneficiar si utilizásemos biodiésel en la proporción correcta, y alguna que otra desventaja. Están resumidas en la *Tabla 2-4* y *Tabla 2-5*.

Ventajas en la utilización de biodiésel	
Medioambientales	Reduce las emisiones totales de CO ₂ .
	No contiene azufre, por lo que su combustión no produce óxidos de azufre.
	Es biodegradable. Un vertido accidental tendría un efecto insignificante en comparación a un gasóleo tradicional.
	Reduce la dependencia del petróleo.
Técnicas	Su número de cetano es ligeramente superior al del diésel tradicional, por lo que mejora la calidad de la combustión.
	Es un combustible oxigenado, por lo que contribuye a mejorar la calidad de la combustión.
	Reduce la emisión de partículas sólidas.
	Tienes mayor lubricidad que el diésel procedente del petróleo.
	Puede utilizarse aceite de cocina usado como materia prima.

	Fácilmente miscible con diésel.
Económicas	Impulsa el sector primario incentivando la economía de zonas rurales.
	Su precio fluctúa menos que el del petróleo (y sus derivados).
Sociales	Genera nuevos puestos de trabajo en países que no dispongan de reservas de petróleo.
	Reduce el éxodo rural.
	Reactiva campos de cultivo abandonados.
	Supone una alternativa a los combustibles fósiles.

Tabla 2-4. Ventajas de la utilización de biodiésel [7], [12].

Desventajas en la utilización de biodiésel	
Técnicas	Su poder calorífico es ligeramente menor que el del gasóleo tradicional.
	Puede atacar y disolver ciertos polímeros con los que se fabrican juntas y retenes.
	El biodiésel en proporciones altas tiende a elevar el nivel de NOx emitido, especialmente en cargas altas.
	Se degrada fácilmente si se deja almacenado durante largos periodos de tiempo.
	Contiene humedad y es propenso a que se formen depósitos de por microorganismos.
	Su viscosidad puede ocasionar problemas a la hora de ser usado en climas fríos.
Económicas	Su precio de producción sigue siendo alto independientemente de la materia prima utilizada.
	La relación entre el área de cultivo necesaria para extraer 1 L de biocombustible no es rentable actualmente.

Tabla 2-5: Desventajas de la utilización de biodiésel [7], [12].

2.2.6 Conservación y almacenaje

Uno de los principales inconvenientes del biodiesel es su resistencia a ser almacenado durante largos periodos de tiempo, mucho menor que el del diésel convencional. La resistencia a la oxidación es uno de los requisitos que debe cumplir el combustible para seguir la norma D6751 o EN 14214 (americana y europea respectivamente). Para esto se somete al combustible al método de medida de oxidación Rancimat, debiendo obtener valores menores a 3 horas en el caso de la americana, y 6 en el caso de La europea. Por su naturaleza química, los biocombustibles suelen mostrar menos resistencia a la oxidación [7], [9].

Por otra parte, la viscosidad del biodiesel se ve afectada por las bajas temperaturas, lo que de utilizarse directamente puede acarrear problemas de obstrucciones en el filtro de combustible y demás conductos a baja presión. Para su utilización en depósitos que no dispongan de un sistema de

precalentamiento de combustible, es recomendable no utilizarlo con una temperatura ambiente inferior a 10 °C [9].

La presencia de humedad en el biodiesel puede degradarlo si se expone durante largos periodos de tiempo. Esta humedad también puede hacer que crezcan en el combustible microorganismos que pueden ser corrosivos para ciertos polímeros de los que se fabrican componentes del sistema de alimentación de combustible. Estos microorganismos también tienen asociados la formación de lodos que pueden colmatar el filtro de combustible o los conductos por los que circula [7], [9].

2.2.7 Rendimiento y utilización

La densidad energética del biodiesel puro (B100) es un 11% menor que la de su equivalente procedente del petróleo. En la práctica esto se traduce en un ligero aumento de combustible de los motores que utilizan biodiesel como combustible alternativo para el mismo uso o carga. Este aumento de combustible pasa a ser inapreciable en proporciones B20 o inferiores, así como en un uso común de los vehículos automotrices [9]. Numerosos estudios concluyen en que la pérdida de potencia en los motores que utilizan mezclas con proporciones altas de biodiésel o incluso biodiésel puro solo es notable con un uso intensivo y a cargas altas o máximas, mientras que para la mayoría de conductores la diferencia en cuanto a percepción de potencia fue ínfima o nula [6].

Se han visto también otra serie de problemas relacionados con el biodiesel, pero solo se han dado en algunos fabricantes. Estos problemas incluyen: incompatibilidad con ciertos tipos de juntas tóricas, obstrucción de filtros de combustible debido a la propiedad disolvente del biodiesel y degradación prematura del aceite lubricante. Estos problemas son de pequeña magnitud y fácilmente subsanables con un cambio de diseño o realizando mantenimientos de forma más asidua [9], [13].

Otro problema encontrado en la utilización de biodiesel es la congelación cuando se encuentra a menos de 10 °C. Cabe destacar que solo se da en las mezclas más puras, pero puede suponer un problema según la zona geográfica y el uso del vehículo o motor. Por debajo de 10 °C el biodiesel se solidifica formando una cera que se adhiere a las paredes de los conductos y depósitos que lo contienen [14]. En la *Figura 2-3* se puede ver el incremento de la viscosidad para biodiésel procedente de aceite de palma (BACP), oleína (BOCP) y estearina (BECP).

Para un uso óptimo en temperaturas próximas o inferiores a esos 10 °C, se ha visto que lo ideal sería tener un sistema de doble combustible (B100 y diésel, por ejemplo), en el que, sabiendo el ciclo de funcionamiento del motor, se arrancase el mismo utilizando diésel y luego, se cambie al B100 precalentado. Una vez se vaya a acabar con el ciclo de encendido, se recomienda volver al diésel convencional para “limpiar” de biodiésel el circuito y no encontrarnos problemas de congelación al volver a arrancar.

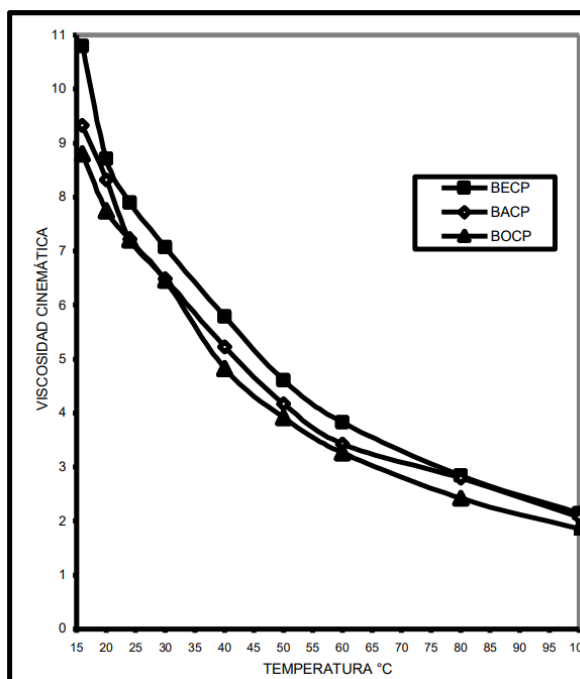


Figura 2-3: Gráfico de variación de la viscosidad de diferentes tipos de biodiésel con la temperatura [15].

2.2.8 Producción nacional. Cuota de mercado.

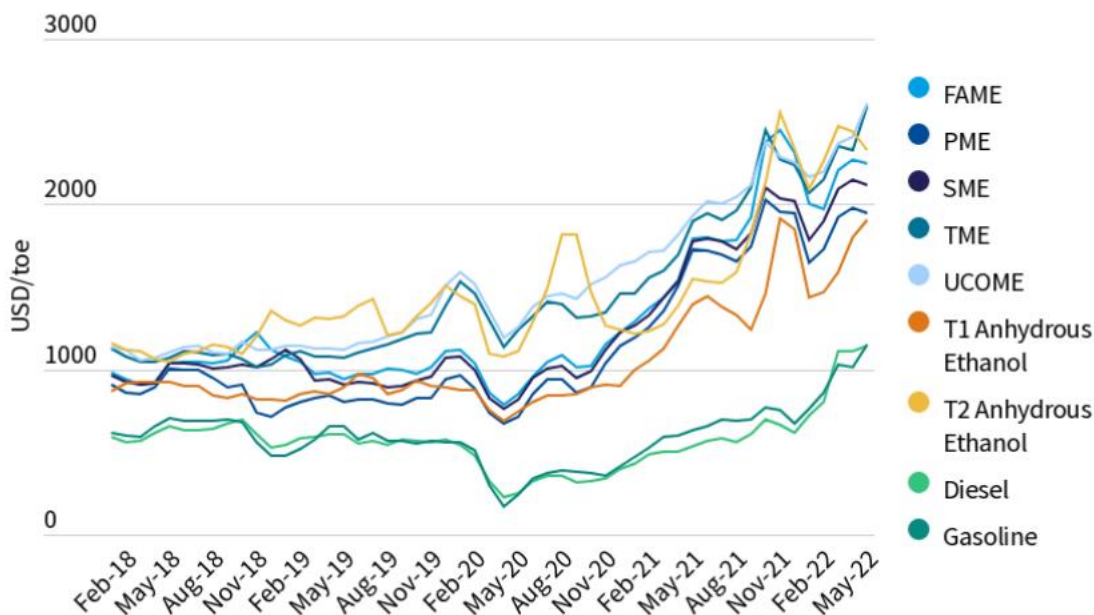
La producción nacional de biocombustibles ha experimentado un descenso progresivo desde el año 2020, en el que el cómputo de los biocombustibles alcanzó una cuota de mercado del 7,3% [16]. Dentro de esa cuota de mercado, el biodiésel no ha dejado de crecer hasta el 78% del total de los biocombustibles en 2022, aumentando también la cantidad de biodiésel importado y exportado.

Las ventas de biodiésel de los productores españoles también decrecieron con respecto a los anteriores ejercicios, siguiendo la tendencia al alza de la exportación. Por otra parte, el número total de empleos creados de la producción de biodiésel descendió ligeramente manteniendo el número cercano a las 4000 personas entre empleos directos e indirectos [16].

2.2.9 Precio de mercado. Viabilidad.

Para que un combustible sea atractivo para el consumidor debe cumplir una serie de requisitos: poseer una cantidad neta de energía parecida a la del combustible (o tipo de energía) a la que va a sustituir, tener un precio de mercado parecido o inferior al del combustible al que sustituye (ser competitivo) y tener una ventaja medioambiental respecto a su competidor [12].

El biodiesel cumple casi todos estos requisitos menos el más importante para un pragmático consumidor final, el del precio. El precio de venta del biodiésel es entre un 70-130% más caro que su alternativa procedente del petróleo [17], lo que elimina todo el atractivo a la utilización del biocombustible. El factor que es mucho más acuciado en el caso del diésel tradicional es sus continuos cambios de precio debido al precio del petróleo y su fluctuación. El precio de los biocombustibles puede cambiar indudablemente (fenómenos meteorológicos adversos, enfermedades, etc.) pero la variación va a ser mucho menor y de forma más gradual que la del petróleo [12]. En la *Figura 2-4* se puede ver la variación en el precio de diferentes biocombustibles y combustibles tradicionales durante 4 años, siendo el FAME (*fatty acid methyl esters*) el valor correspondiente al del biodiésel.



Source: T&E analysis based on data provided by Stratias Advisors

Figura 2-4: Variación del precio de los combustibles desde febrero de 2018 [18].

Definitivamente, y sin una ayuda económica en forma de subsidio, subvención o exención fiscal los biocombustibles no conseguirán llegar al consumidor final como una alternativa atractiva, ya que los beneficios que generan al mismo no compensan ese aumento en el precio por litro [12].

2.3 El motor diésel

2.3.1 Reseña histórica

El desarrollo de los motores diésel se remonta al año 1895, cuando Rudolf Diesel comenzó con el proyecto. Hacia el año 1897 dio con la primera máquina diésel de 25 caballos de vapor de potencia y una alta eficiencia con un diseño sencillo. Un año más tarde presentaría en Múnich el primer motor “utilizable” monocilíndrico y refrigerado por líquido, pero pronto recibiría grandes modificaciones y mejoras [11].

No fue hasta casi un siglo más tarde cuando los motores diésel recibirían los cambios más sustanciales, con la introducción de la inyección directa, la gestión electrónica y los turbocompresores. Todas estas mejoras optimizaron los motores pero también los convirtieron en las máquinas complejas que conocemos hoy en día [11].

2.3.2 Funcionamiento

El motor diésel se clasifica como un motor de combustión interna, rotativo y que puede ser de dos o cuatro tiempos. En el presente trabajo nos centraremos en los motores de cuatro tiempos, ya que su uso es más generalizado que el de dos, reservado a grandes motores marinos.

A diferencia de los motores de gasolina, los motores de ciclo diésel no necesitan una chispa que inicie la combustión de la mezcla en el interior de la cámara de combustión. Por el contrario, su funcionamiento se basa en “preparar” esa cámara de combustión en la carrera de compresión del pistón

para crear un aumento de presión y temperatura en la que se inyecta el combustible a alta presión, comenzando una combustión y creando la sobrepresión que empuja el pistón hacia abajo, creando trabajo [11].

2.3.3 Tipos de Inyección de combustible

Los motores diésel han experimentado cambios y mejoras de su diseño desde su creación hace más de 100 años. Estos cambios han tenido objetivos relacionados, pero no siempre iguales a lo largo de la historia. En la primera mitad del siglo XX la optimización tenía como objetivo la reducción del consumo de combustible para reducir el coste de utilización del usuario final. Desde la aparición de las normativas que restringen los niveles de emisiones es cuando la tecnología de estos motores ha sido perfeccionada y optimizada a niveles inusitados. Los objetivos para este siglo y finales del pasado han sido, además de la reducción del consumo de combustible (rendimiento del motor) la reducción de cualquier tipo de contaminante (gas, líquido o sólido) que resultase de la combustión del mismo [11].

Los primeros motores diésel eran atmosféricos (o de aspiración natural), y no fue hasta principio de los años 80 cuando se les incorporó un turbocompresor por primera vez. En la actualidad los motores atmosféricos se reservan a pequeña maquinaria agrícola o generadores eléctricos.

En cuanto a la inyección de combustible, la primera bomba lineal se instaló en un vehículo a finales de los años 20. Era de sencillo funcionamiento, accionada por el árbol de levas y pilotada por un regulador centrífugo y una cremallera de mando. Además, disponía de un regulador hidráulico del avance de la inyección.

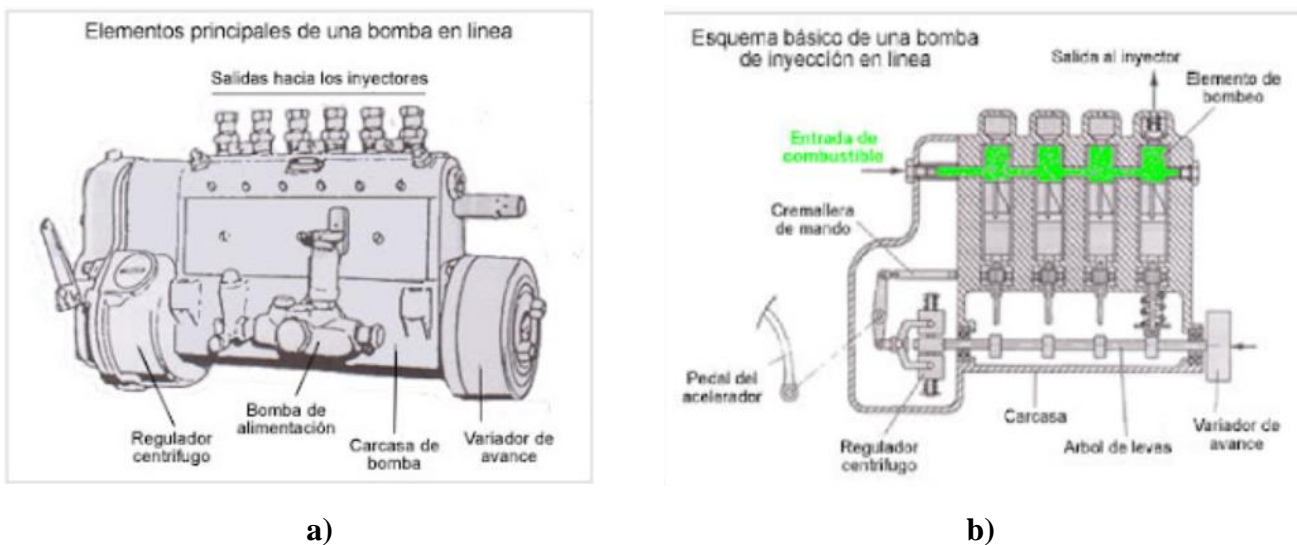


Figura 2-5: Vista exterior (a) y seccionada (b) de una bomba de inyección en línea diésel.

Las bombas de inyección fueron mejorando su diseño y aumentando progresivamente la presión a la que inyectaban el combustible, así nació la bomba de pistones axial y su versión con regulación electrónica a finales de los años 80.

La gran revolución vino con la introducción de la inyección directa, que vino para sustituir la inyección indirecta en la precámara de combustión para realizar la inyección de combustible directamente en la cámara de combustión. El primer sistema se denominó TDI y funcionaba mediante inyectores mecánicos y una bomba controlada electrónicamente que generaba un impulso por cada ciclo de inyección.



Figura 2-6: Vista superior de un motor con tecnología TDI.

Posteriormente se crearía la tecnología actual llama “*common-rail*” por su característica rampa de inyección o acumulador. Esta rampa no es más que una tubería de la que se alimenta cada inyector por un conducto individual. En este caso, la bomba de inyección no genera impulsos sino una presión constante que puede llegar a los 2000 y 2200 bar en determinados momentos, y son los inyectores (controlados electrónicamente) los que permiten la entrada de combustible en el momento y cantidad que la unidad de control así lo determina. Este sistema es el actualmente empleado por los vehículos diésel para poder cumplir con la normativa de emisiones. La ventaja de este sistema y de los inyectores actuales es que permiten un número de inyecciones muy alto (hasta 6) por ciclo, optimizando así la atomización y combustión de todo el combustible y en las mejores condiciones posibles [11], [19].

2.3.4 Emisiones producidas

Es bien sabido que cualquier proceso de combustión de un hidrocarburo va a producir como resultado dióxido de carbono, vapor de agua y calor, pero las condiciones tan extremas que se dan en el interior de una cámara de combustión hacen que se emitan otra serie de contaminantes a los que actualmente se intenta corregir mediante distintas técnicas, mostradas en la *Tabla 2-6*. Los valores límites de estos contaminantes se ven reducidos a medida que han ido apareciendo nuevas versiones de la normativa Euro, como se muestra en la *Figura 2-7*.

Características	EU4	EU5	EU6	EU6 Pesada
Recirculación de gases de escape a alta presión	X		X	X
Recirculación de gases de escape a baja presión		X	X	X
Válvula de recirculación de gases de escape	X		X	X
Válvula de recirculación de gases de escape (no refrigerada)		X	X	X
Sistema SCR (<i>AdBlue</i>)			X	X
Catalizador de 4 vías (recubrimiento modificado en los monolitos)			X	
Sensor de presión en los cilindros			X	X

Tabla 2-6: Elementos añadidos al motor diésel para cumplir normativa de homologación europea[20, p. 6].

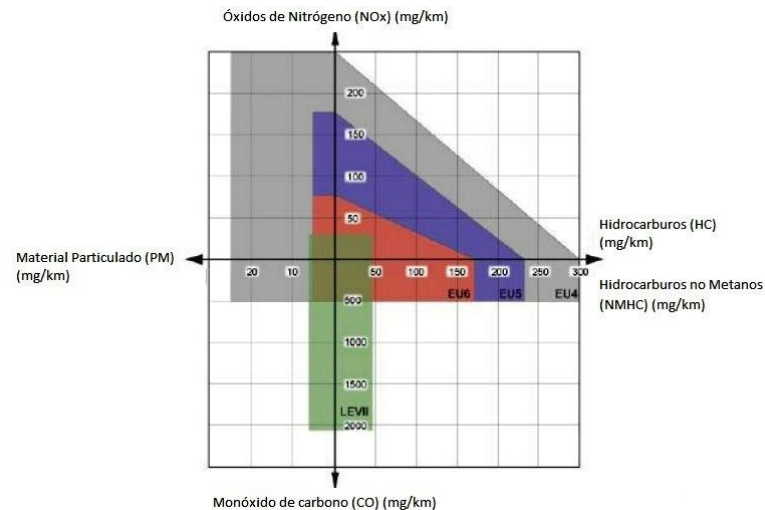


Figura 2-7: Niveles de contaminantes permitidos por cada normativa Euro [20].

Dióxido de Carbono

Es un compuesto gaseoso cuyo resultado es inherente a un proceso de combustión. Es el principal responsable del efecto invernadero y, aunque también es producido en procesos naturales como la fotosíntesis, la actividad humana es la que más contribuye a su emisión a la atmósfera. Para intentar reducir su emisión la estrategia de los fabricantes de motores pasa por aumentar la eficiencia de los mismos, es decir, producir la misma potencia consumiendo menos combustible, y por lo tanto reduciendo la emisión de dióxido de carbono.

Monóxido de Carbono

Este compuesto altamente tóxico para los seres vivos se produce debido a una mala combustión. Aunque es más común que se produzca en motores gasolina que trabajen con mezclas pobres, también puede ser generado por los motores diésel.

La combustión del gasóleo dentro de la cámara de combustión no es un proceso homogéneo, sino que se produce un frente de llama que avanza a una velocidad determinada por una serie de características constructivas de la cámara de combustión. Este efecto produce que la combustión en zonas pequeñas de la cámara de combustión sea mala o incompleta, lo que produce monóxido de carbono.

Para reducir e intentar eliminar las emisiones de este gas los fabricantes trabajan en dos estrategias. La primera consiste en mejorar el diseño de la cámara de combustión, así como del flujo de aire que entra en la misma en la carrera de admisión. Esto permite que el combustible se distribuya mejor por todo el volumen de la cámara de combustión y no se produzcan zonas de “mala combustión” o de combustión incompleta. La segunda estrategia corre a cargo de los convertidores catalíticos (o catalizadores) que en su primera fase de funcionamiento oxidan el monóxido de carbono para convertirlo en CO_2 y agua.

Dióxido de azufre, ácido sulfúrico y ácido sulfuroso

Estos tres compuestos del azufre son altamente contaminantes para el medio ambiente y tóxico para personas y seres vivos. Se producen siempre y cuando se utilicen combustibles que contengan azufre en su composición. Actualmente la normativa europea no permite que el contenido en azufre de los gasóleos sea de más de 10 ppm por lo que las emisiones de estos compuestos se están mitigando progresivamente.

Hidrocarburos

Los hidrocarburos son restos de combustible que no se han quemado y que salen de la cámara de combustión hacia el sistema de escape. La emisión de hidrocarburos actualmente es residual en comparación a lo que fue en el pasado debido a la eficiencia y el diseño de los motores. La reducción de su emisión pasa por mejorar el diseño de la cámara de combustión y del flujo de aire, así como una adecuada atomización del combustible a la hora de inyectarse. Como medida correctora, y al igual que en el caso del monóxido de carbono, será la primera etapa del convertidor catalítico la que se encargue de oxidar los hidrocarburos no quemados anteriormente.

Hollín (partículas sólidas)

Las partículas sólidas se producen como resultado de la combustión de pequeñas cantidades de aceite que entran a la cámara de combustión a través de dos caminos diferentes. El primero es a través de los segmentos del pistón si se utiliza un aceite que no es adecuado o cuando el motor no ha alcanzado su temperatura de funcionamiento óptima. La segunda es a través del decantador de vapores de aceite (válvula PCV) a través de la admisión de aire. Las partículas de hollín tienen un efecto muy perjudicial para las personas, en especial para el sistema respiratorio. Estas partículas de micras de tamaño penetran fácilmente en los alveolos y el organismo es incapaz de eliminarlas, por lo que se van acumulando. Para reducir su emisión, se montan en los vehículos filtros de partículas formados por un cilindro con paneles porosos en forma de panal de abeja. Las partículas se adhieren al material poroso hasta que, al cabo de ciertas horas de funcionamiento del motor, se realiza una regeneración del filtro de partículas. En el proceso de regeneración y mediante estrategias de inyección, se eleva la temperatura de los gases de escape hasta producir un proceso de pirólisis con los restos de partículas sólidas (600-650 °C), liberando el filtro antes de que se colmate.

Óxidos de Nitrógeno (NOx)

La emisión de óxidos de nitrógeno tiene un apartado específico en el presente trabajo. Se trata de un compuesto altamente tóxico para los seres vivos. Las medidas preventivas para reducir sus emisiones pasan por mejorar el diseño de la cámara de combustión para reducir la temperatura dentro de la misma. Como medidas correctoras encontramos la reducción de estos en la segunda etapa del convertidor catalítico o mediante inyección de compuestos de urea como el *AdBlue*.

La reducción catalítica selectiva o *SCR* por sus siglas en inglés es el sistema auxiliar de los motores diésel que se encarga de reducir los niveles de óxidos de nitrógeno en los conductos de escape. El sistema está formado por los siguientes elementos:

- Catalizador SCR. Es el lugar físico donde los NOx son reducidos a N₂ y O₂ en presencia de un catalizador.
- Sensores de NOx, temperatura y presión. Monitorizan el funcionamiento del sistema y la temperatura y niveles de NOx en los gases de escape, así como el estado de los catalizadores.
- Unidad de control. Centralita electrónica programada para el funcionamiento del sistema.
- Circuito de inyección de *AdBlue*. Está a su vez formado por un depósito, una bomba, conductos y un inyector de *AdBlue* al tubo de escape.

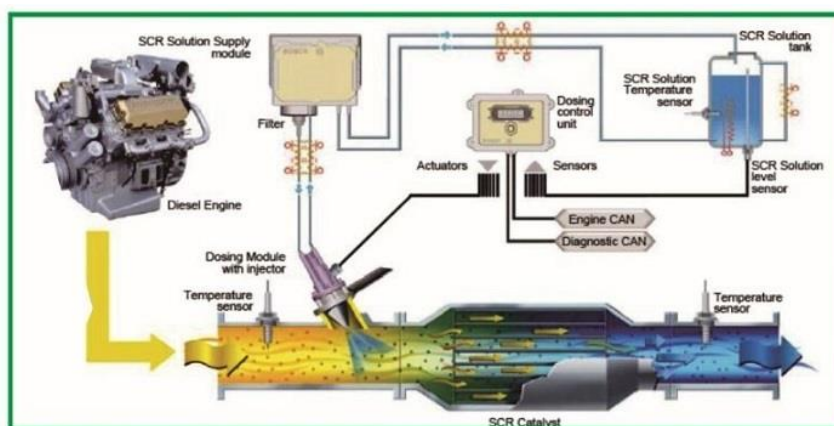


Figura 2-8: Componentes de un sistema SCR [21].

2.4 Efectos del uso del biodiésel en motores diésel.

Numerosos estudios sostienen que la utilización de biocombustibles en un motor diésel convencional produce un aumento en la emisión de óxidos de nitrógeno (NOx) de entorno a un 11%, y que es uno de los principales inconvenientes a la hora de presentarlos como alternativa a los gasóleos convencionales. La medida en la que aumenta esta emisión no es algo fijo y constante, sino que depende de un gran número de variables como se expondrá a continuación. Las dos principales razones de este aumento en la emisión son el comportamiento del combustible dentro de la cámara de combustión y la calibración o ajuste de estos motores [22].

	Aumenta	Igual	Reduce
Potencia máxima	-	2	96
Consumo de combustible específico.	98	2	-
Eficiencia térmica	8	80	4
Emisión de NOx	85	10	5
Emisión partículas	3	2	95
Emisión hidrocarburos	1	3	95
Emisión CO	2	7	90

Tabla 2-7: Número de estudios y resultados obtenidos para diferentes valores de rendimiento al utilizar biodiésel en motores diésel convencionales [13].

2.4.1 NOx “térmico”

En las pruebas realizadas en motores convencionales y con la capacidad de analizar lo que sucede en el interior de la cámara de combustión se pudieron apreciar diferencias a la hora de entrar en combustión con el motor equivalente [22].

El elevado número de cetanos del biodiésel hace que entre en combustión antes, de forma más rápida y violenta que el gasóleo tradicional. Esto produce temperaturas más altas en la cámara de combustión, y que el aire a altas temperaturas permanezca durante más tiempo en la misma, lo que favorece la aparición de NOx. La generación de NOx debido a este factor supone el 90% del total de los NOx. Como

se puede ver en la *Figura 2-9* cuando se abre la válvula de escape se produce un desequilibrio en la reacción de combustión que genera un aumento de NO_x [24].

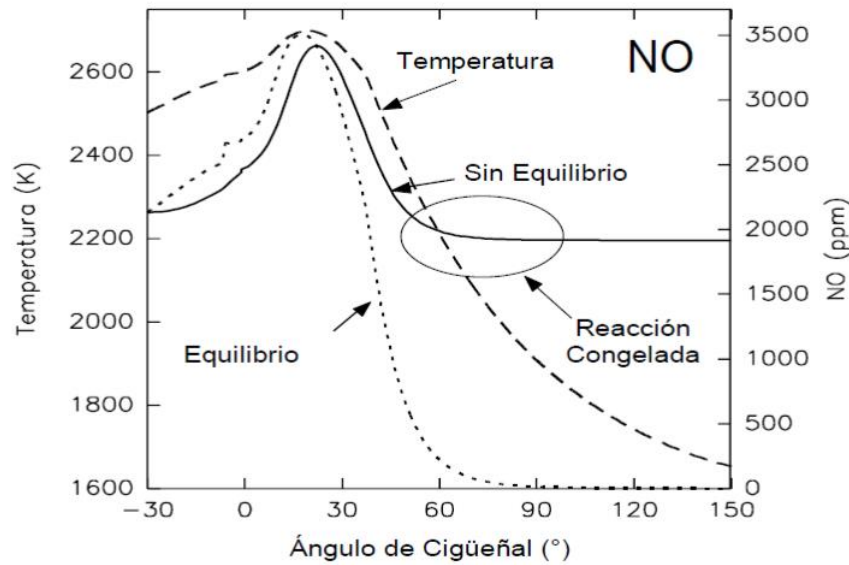
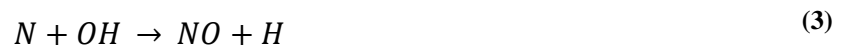


Figura 2-9: Generación de NO según la temperatura y ángulo del cigüeñal [24].

Al igual que el número de cetanos, otra característica química como la temperatura de llama adiabática también es mayor en el biodiésel, por lo que tendrá efectos similares que el número de cetanos. Otra característica química que favorecerá el aumento en la emisión de NO_x es la cantidad de enlaces dobles de carbono presentes en la estructura química del biodiésel. Este número de enlaces dobles es mayor que en biodiésel convencional, por lo que va a generar mayor temperatura a la hora de entrar en combustión.

El biodiésel es un combustible oxigenado, por lo que produce menos hollín y partículas sólidas que el gasóleo tradicional. Aunque este aspecto es positivo para el funcionamiento del motor y su nivel de emisiones de partículas, estas juegan un papel muy importante a la hora de extraer calor de la cámara de combustión. De nuevo, con esta producción de hollín menor se va a aumentar la temperatura dentro de la cámara de combustión, y por ende la producción de NO_x [25]. A continuación, en (1), (2) y (3) se muestran las reacciones de formación del NO según la temperatura a la que se forme.



2.4.2 NO_x por calibración

Los avances tecnológicos en los sistemas de inyección de combustible de los motores hacen que cada ciclo de inyección sea configurable hasta niveles inusitados. La cantidad de combustible inyectada se puede ajustar con gran precisión gracias a los sistemas de inyección directa modernos. El tiempo de inyección, el número de inyecciones por ciclo y el avance con respecto al punto muerto superior son otros parámetros configurables en la unidad de control de un motor. Actualmente se configuran todos estos parámetros para cada situación determinada de velocidad del motor y carga en lo que se llama “mapa motor”.

Los cambios realizados en el mapa motor cuando se hace trabajar un motor diésel con biocombustibles van encaminados a retrasar ligeramente el punto de comienzo de inyección. Esta variación hará que, como se ha visto anteriormente, la temperatura máxima que se alcance en la cámara de combustión, así como el tiempo al que el aire está expuesto a esa temperatura sea menor, por lo que se generará un menor nivel de NOx [23].

2.4.3 Medidas para reducir la emisión de NOx

El aumento de las emisiones de NOx de los motores que utilizan biodiesel está demostrado por una gran cantidad de estudios, pero bien es cierto que en la mayoría se relaciona este aumento con el funcionamiento de estos motores a cargas altas, muy altas o máximas. Esto se debe a la necesidad por parte de la unidad de control de adelantar la inyección para facilitar la combustión en estas cargas. Este efecto tiene como consecuencia que las pruebas hechas sobre vehículos no den como resultado un aumento de NOx tan significativo como el que se obtiene en los test de laboratorio, ya que circulando con un vehículo el motor trabaja a cargas altas y muy altas en momentos muy determinados [9].

Las medidas correctivas para este aumento pasan por cambiar los tiempos o calibración del motor, así como jugar con diferentes mezclas y proporciones de diésel. Estos cambios deben ser específicos para cada tipo de motor, ya que se han podido apreciar una gran diferencia de comportamiento de un motor a otro, o de un tipo de inyección a otro (directa/indirecta, convencional/*common-rail*). Estas medidas pueden ir acompañadas de un sistema de recirculación de gases (EGR) por sus siglas en inglés, para reducir ligeramente el nivel de oxígeno que entra en la cámara de combustión e intentar reducir la generación de los NOx.

En cuanto a las medidas correctivas para los gases de combustión, y ya desde la implementación de la “Euro-6” en 2014 la inmensa mayoría de vehículos diésel tienen un sistema de inyección de urea en el sistema de escape. Sin este sistema, no podrían cumplir el máximo de 0.08 g/km de NOx exigido por la normativa europea [3]. La inyección de urea, conocido como *AdBlue* por su nombre comercial, tiene como objetivo la reducción de los NOx en nitrógeno (N₂) y vapor de agua (H₂O). La urea reacciona con el agua en la que está disuelta gracias a la temperatura que alcanza el tubo de escape, en concreto el convertidor catalítico del vehículo, para dar amoníaco (NH₃) como resultado. Este amoníaco reduce y convierte los NOx en nitrógeno molecular y agua.

3 DESARROLLO DEL TFG

El presente trabajo se basa en los ensayos realizados sobre un grupo electrógeno Monzón que se encuentra en el laboratorio de máquinas y motores navales perteneciente al Centro Universitario de la Defensa, dentro de la Escuela Naval Militar de Marín. Este generador eléctrico había sido utilizado únicamente como material de apoyo a la docencia y nunca se había usado para realizar mediciones sobre él. Por este motivo hubo que diseñar y construir una instalación eléctrica para poder poner el grupo en carga. La carga resistiva consiste en un grupo de resistencias, así como una caja de registro con un selector y luces indicativas. Fue necesario también realizar modificaciones en el sistema de escape para introducir la sonda de un equipo de medición de gases, y se construyó un sistema de alimentación de combustible paralelo al de origen para no contaminar el original con otro combustible y poder utilizar un depósito sobre una balanza hidrostática.

A continuación, se detallarán los elementos que constituyen el grupo electrógeno e instalación eléctrica, así como el material utilizado para la obtención de datos y la alimentación de combustible con biodiesel y diésel convencional.

3.1 Banco de ensayos

El banco de ensayos lo forman el grupo electrógeno Monzón, así como el resto de los elementos auxiliares necesarios para llevar a cabo las pruebas. El banco está formado por los siguientes elementos:

- Grupo electrógeno Monzón formado por un motor Perkins atmosférico modelo 403D-15 de 13,5 kW y un generador Stamford de 14 kW.
- Analizador de gases de escape Testo 340.
- Medidor de caudal y temperatura Testo 405i.
- Controlador del grupo electrógeno SAM 716 con ordenador para registro de datos.
- Cuadro de mando para conexión de las resistencias.
- Resistencia trifásica conectada en estrella de 8 y 4 kW.
- Depósito de combustible con balanza hidrostática.

3.1.1 Grupo electrógeno Monzón

El grupo electrógeno está formado por un motor diésel acoplado a un grupo generador. El grupo genera una potencia máxima de 13,5 kW y está montado sobre una bancada de acero que hace también de depósito de combustible.

3.1.1.1 Motor Perkins

El motor Perkins 403D-15 es un motor diésel tricilíndrico atmosférico (sin sobrealimentación) con inyección indirecta en una precámara de combustión. El resto de las características se muestran en la *Tabla 3-1*.

Especificaciones motor Perkins 403D-15	
Velocidad máxima de operación (rpm)	3000
Velocidad de operación (rpm)	1500
N.º cilindros y configuración	3 cilindros en línea
Cilindrada	1496 cc
Aspiración	Natural (atmosférica)
Relación de compresión	22,5:1
Orden de encendido	1-2-3
Inyección	Indirecta

Tabla 3-1: Características del motor Perkins utilizado.

Al motor se le ha realizado un circuito de alimentación de combustible alternativo que se explicará más adelante.

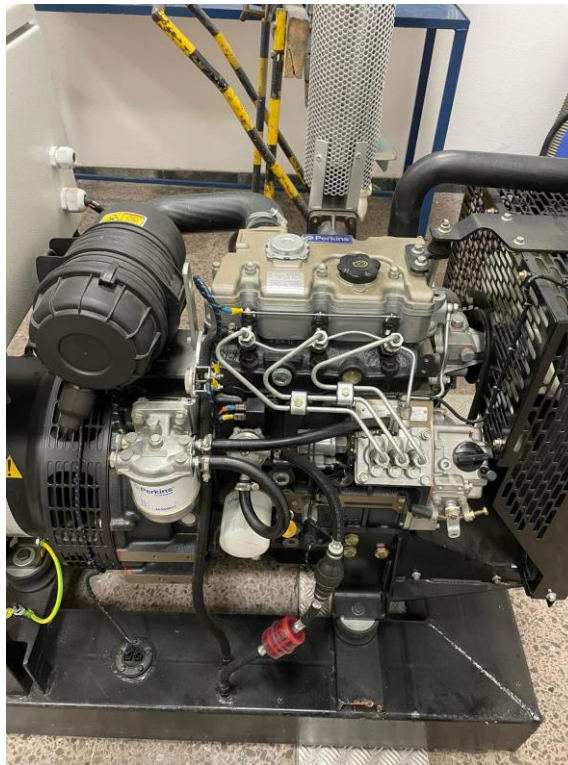


Figura 3-1: Vista general del motor Perkins (autoría propia).

En el manual de utilización del motor Perkins existe un apartado que habla sobre los combustibles con los que puede trabajar el mismo, clasificados según la *Tabla 3-2*.

Grupo de combustible	Clasificación	Efecto sobre la vida útil
Grupo 1	Combustibles preferidos	Vida útil máxima del producto.
Grupo 2	Combustibles permisibles	Pueden reducir la vida útil y el rendimiento del motor.
Grupo 3	Combustibles de aviación	Reducen la vida útil y el rendimiento del motor.
Grupo 4	Biodiésel	-

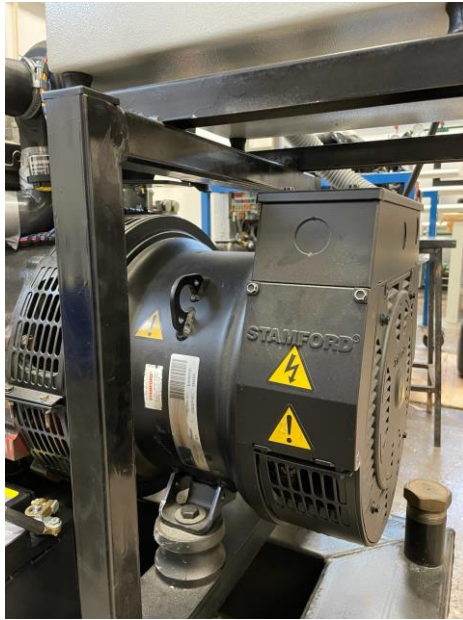
Tabla 3-2: Tipos de combustibles utilizables en el motor Perkins.

El manual recomienda que la proporción máxima de biodiésel sea del 10%, y siempre cumpliendo la normativa europea o americana para cada caso. Para su utilización con biodiésel, se indica seguir una serie de recomendaciones adicionales, tales como:

- Revisar el estado del aceite con mayor asiduidad. El uso del biodiésel puede hacer que se degrade prematuramente.
- Revisar de forma regular el estado de juntas y retenes. El biodiésel podría atacarlos.
- Tener precaución si se va a operar en climas fríos ya que el biodiésel podría variar su viscosidad o incluso solidificarse.
- Revisar y eliminar el nivel de agua de los tanques de combustible, ya que el biodiésel es más susceptible de generar microbios que pueden contaminar el combustible.

3.1.1.1 Generador Stamford

Se trata de un generador trifásico síncrono modelo PI044H1 acoplado al motor con relación de transmisión 1:1. Trabaja a 50 Hz y genera una potencia máxima de 14 kW. A su salida se ha conectado el conjunto de resistencias con un conector de 5 pines y 32 A.



a)



b)

Figura 3-2: Generador Stamford (a) y conexión con grupo de resistencias (b) (autoría propia).

3.1.1.2 Controlador del equipo electrógeno SAM 716

Es un controlador para grupos electrógenos como el utilizado en los ensayos. Se ha utilizado la conexión mediante USB a un ordenador y el software COMSVE_SAM716. Este programa nos muestra datos relativos a parámetros eléctricos, así como alarmas e información general del motor. El controlador se ha utilizado para comprobar el correcto funcionamiento del grupo a la hora de ponerlo en carga y monitorizar su funcionamiento.



Figura 3-3: Controlador SAM conectado a un ordenador (autoría propia).

3.1.2 Medidor Testo 340

El medidor Testo 340 es un analizador de gases de escape de motores. Ofrece una gran variedad de valores en tiempo real. Los valores que registraremos serán los mostrados en la *Tabla 3-3*.

<u>Medida</u>	<u>Unidad</u>
Temperatura de gases de escape	°C
Dióxido de carbono CO ₂	%
Monóxido de carbono CO	ppm
Monóxido de nitrógeno NO	ppm
Óxidos de nitrógeno NO _x	ppm
Dióxido de azufre SO ₂	ppm
Oxígeno (O ₂)	%

Tabla 3-3: Medidas registradas con el medidor Testo 340.

Para utilizar el Testo en el generador se ha realizado un agujero en el tubo de escape (después del silenciador) a unos 2 m de altura. Se ha colocado una abrazadera de tuberías sobre él con una rosca y un tornillo para hacer de tapón cuando no se introduzca la sonda. La estanqueidad la asegura una junta de escape entre el tubo y la propia abrazadera. La sonda queda de la manera que se puede ver en la *Figura 3-4 b)* cuando se está utilizando.



a)



b)

Figura 3-4: Agujero para medición de emisiones con tapón (a) y sonda (b) (autoría propia).

3.1.3 Medidor de caudal Testo 405i

Como mejora para el trabajo, se decidió montar una válvula de mariposa para poder restringir el caudal de aire de entrada en la admisión. Para controlar y poder medir ese caudal se utilizó el medidor de caudal y temperatura Testo 450i, montado como se refleja en la *Figura 3-5*, que nos ofrecía los datos en una App para el teléfono móvil como se ve en la misma figura.



a)



b)

Figura 3-5: Medidor de caudal Testo en conducto de admisión (a) y App con datos (b) (autoría propia).

3.1.4 Depósito de combustible con balanza

El depósito utilizado adicionalmente al original es un cubo de 2,3 l transparente, el cual ofrecerá una autonomía más que razonable para los ensayos que se van a realizar. El depósito se colocará sobre una balanza hidrostática electrónica conectada a un ordenador para llevar un registro del consumo de combustible, como se muestra a continuación en la *Figura 3-6*. Originalmente se barajó la opción de utilizar un depósito conectado por dos lados (alimentación y retorno) pero de esta manera no se conseguiría la precisión en la medición necesaria para calcular el consumo de combustible. Finalmente, y tras varias pruebas se optó por usar el cubo, ya que se pudieron sujetar los latiguillos con pinzas de laboratorio para que no tocasen ni el fondo ni las paredes del mismo y la balanza solo midiese la masa de combustible.

La balanza hidrostática utilizada es una Hinotek DSJ-5 de 5 kg de masa máxima y una precisión de 0,1 g. La balanza tiene una salida de cable VGA desde la que podemos extraer las lecturas de masa directamente en el ordenador para posteriormente poder procesar los datos en una hoja de Excel y calcular los consumos de combustible.



Figura 3-6: Depósito auxiliar de combustible con balanza digital para medición de consumos (autoría propia).

Para poder utilizar el generador con biodiésel y evitar la contaminación del depósito original se ha hecho un circuito de alimentación paralelo utilizando grifos de tres vías. Gracias a estos grifos podemos seleccionar qué circuito queremos que alimente el motor en cada momento (original o adicional) haciéndolo pasar por el cebador (1), bomba de alimentación de baja presión (2), filtro (3) y con un retorno de combustible independiente (4). Cada circuito de alimentación está aislado del otro hasta la bomba de alta presión, lo que evitará al máximo la contaminación con biodiésel de los conductos originales.

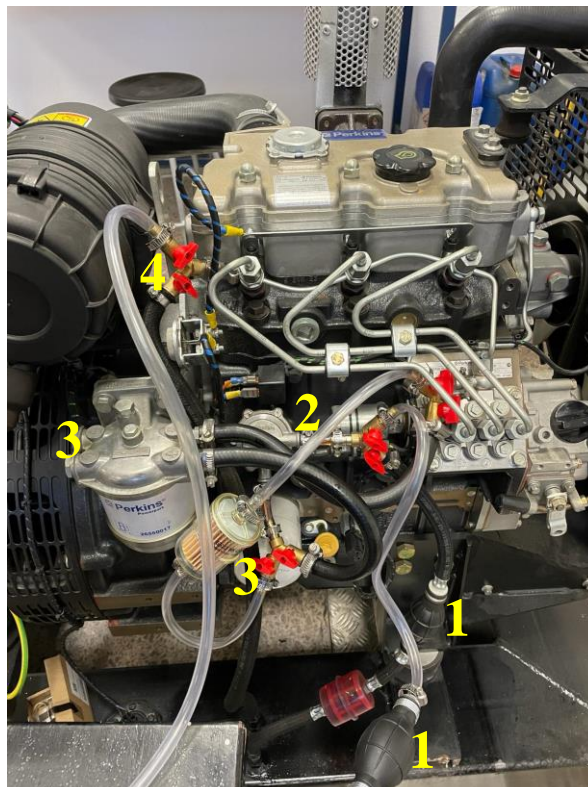


Figura 3-7: Detalle del sistema de alimentación de combustible auxiliar (autoría propia).

Adicionalmente se instaló otro filtro de combustible como el que originalmente contaba el motor únicamente utilizado para el circuito auxiliar. Se atornilló al bloque motor como se puede ver en la *Figura 2-1*, siendo el superior en la imagen el original del motor y el inferior el adicional.



Figura 3-8: Detalle de filtros de combustible para los dos circuitos de alimentación (autoría propia).

3.1.5 Conjunto de resistencias

El conjunto de resistencias se ha utilizado como elemento resistor para poder poner el grupo en carga. Se han utilizado unas resistencias que se encontraban en el mismo laboratorio que el grupo electrógeno, pero que carecían de instalación eléctrica ni circuito de refrigeración.

Se ha fabricado un circuito de refrigeración por líquido para reducir su temperatura cuando se somete el conjunto a una carga. Se podría utilizar un circuito cerrado con una bomba de agua, un depósito de expansión y un radiador, pero por simplicidad se ha preferido utilizar un circuito abierto de agua conectada a la red doméstica y sin necesidad de bomba. De esta manera se asegura la correcta refrigeración del conjunto ya que la temperatura de consigna no se alcanza. Por seguridad se ha añadido un termostato y presostato al circuito, que cortarían la alimentación en caso de que hubiese una presión de agua insuficiente o subiese demasiado la temperatura.

Para realizar las conexiones eléctricas se ha montado el siguiente circuito eléctrico, el cual se puede ver con más detalle en el *Anexo IV*.

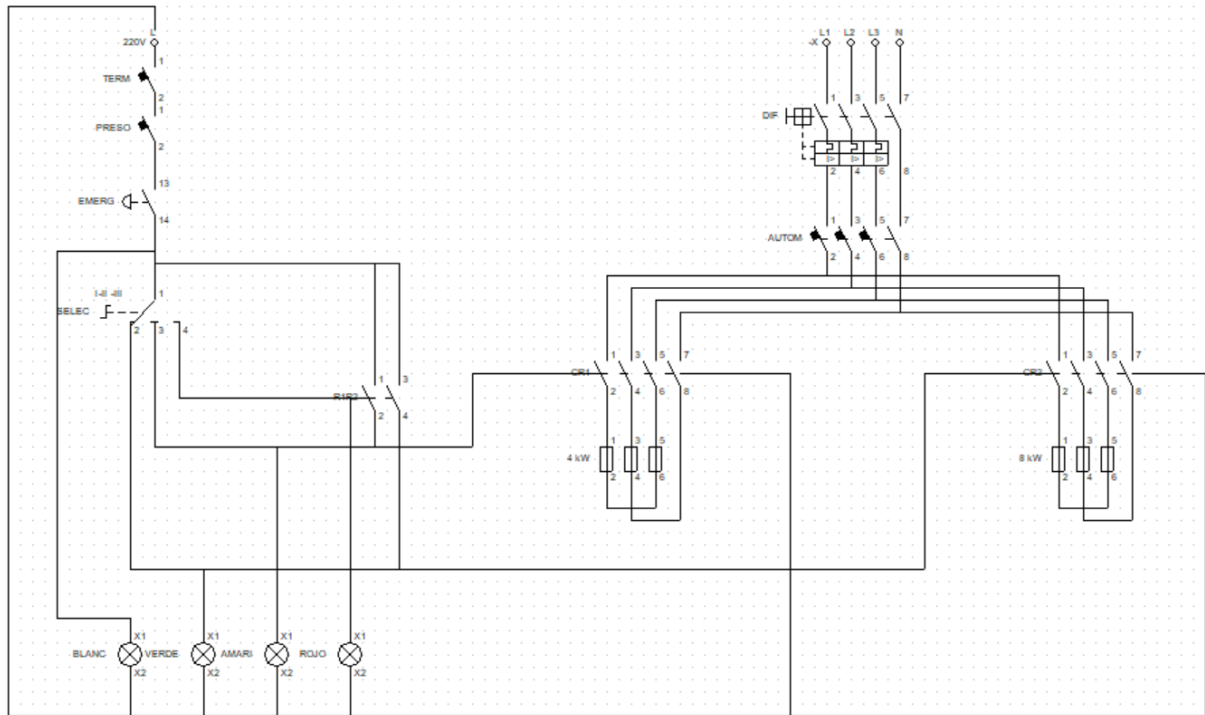


Figura 3-9: Esquema eléctrico de la instalación del conjunto de resistencias (autoría propia).

El circuito se divide en dos partes que se han denominado de fuerza y de mando. El primero de ellos trabaja con un voltaje de 400 V entre fases y cuenta con un diferencial de 25 A como primera medida de seguridad y un magnetotérmico también de 25 A como interruptor del circuito. Desde el magnetotérmico se divide el circuito hacia tres contactores. Cada uno de los contactores (pilotados por el circuito de mando) conectará el grupo de 8 kW y de 4kW por separado, mientras que el tercero activará a los dos primeros. El diferencial, magnetotérmico y contactores se han montado sobre dos railes DIN para realizar la instalación en una caja de registro, mostrándose en la *Figura 3-10*.



Figura 3-10: Instalación eléctrica para el conexionado de resistencias (autoría propia).

Por otro lado, el circuito de mando trabaja con la red doméstica (220 V) y cuenta con un termostato y con un pulsador de seguridad. Alimenta un selector de 4 posiciones que corresponden a las siguientes opciones:

- 0: Circuito apagado.
- 1: Circuito de 4 kW conectado.
- 2: Circuito de 8 kW conectado.
- 3: Circuitos de 8 y 4 kW conectados (12kW).

Cada una de las opciones activará el contactor de la resistencia que queremos conectar al generador. A cada salida del contactor se le ha conectado en paralelo una bombilla para comprobar su funcionamiento. Se ha elegido el color blanco para la opción 0 (ninguna resistencia conectada, pero con tensión), verde cuando se conecta la resistencia de 4 kW, amarillo para la de 8 kW y una bombilla roja cuando se conectan ambas resistencias (12 kW). En la *Figura 3-11* se puede ver un detalle de las conexiones de las bombillas, el selector de cuatro posiciones y del pulsador de seguridad.

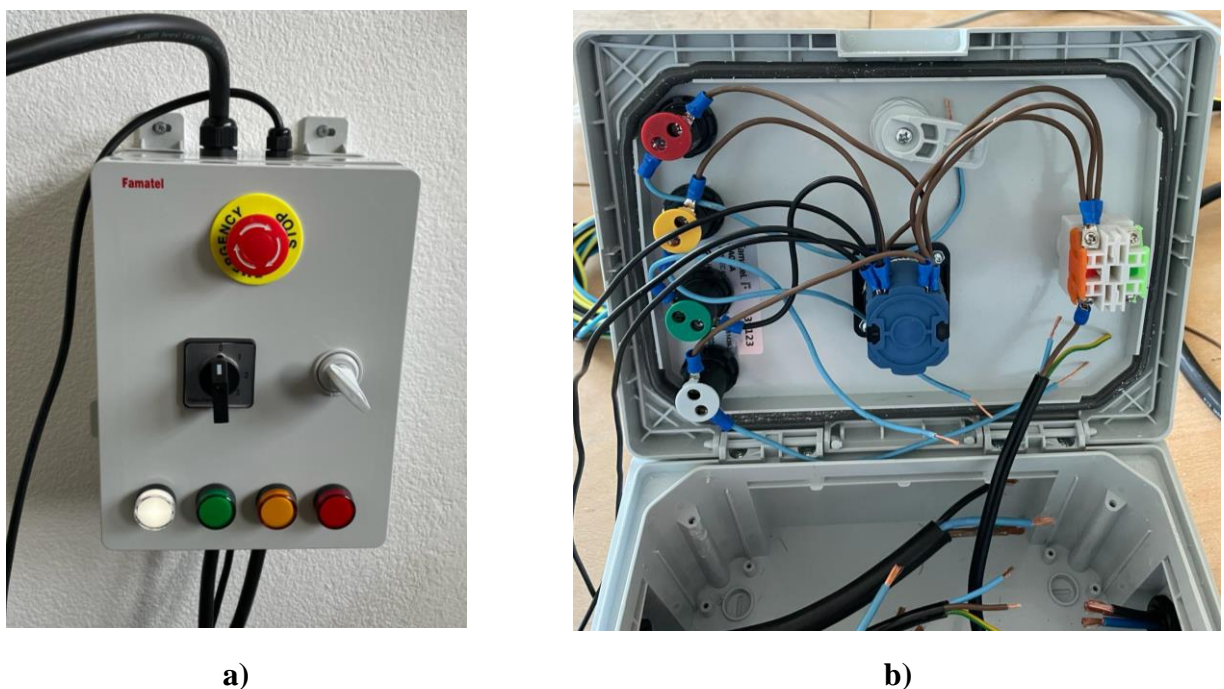
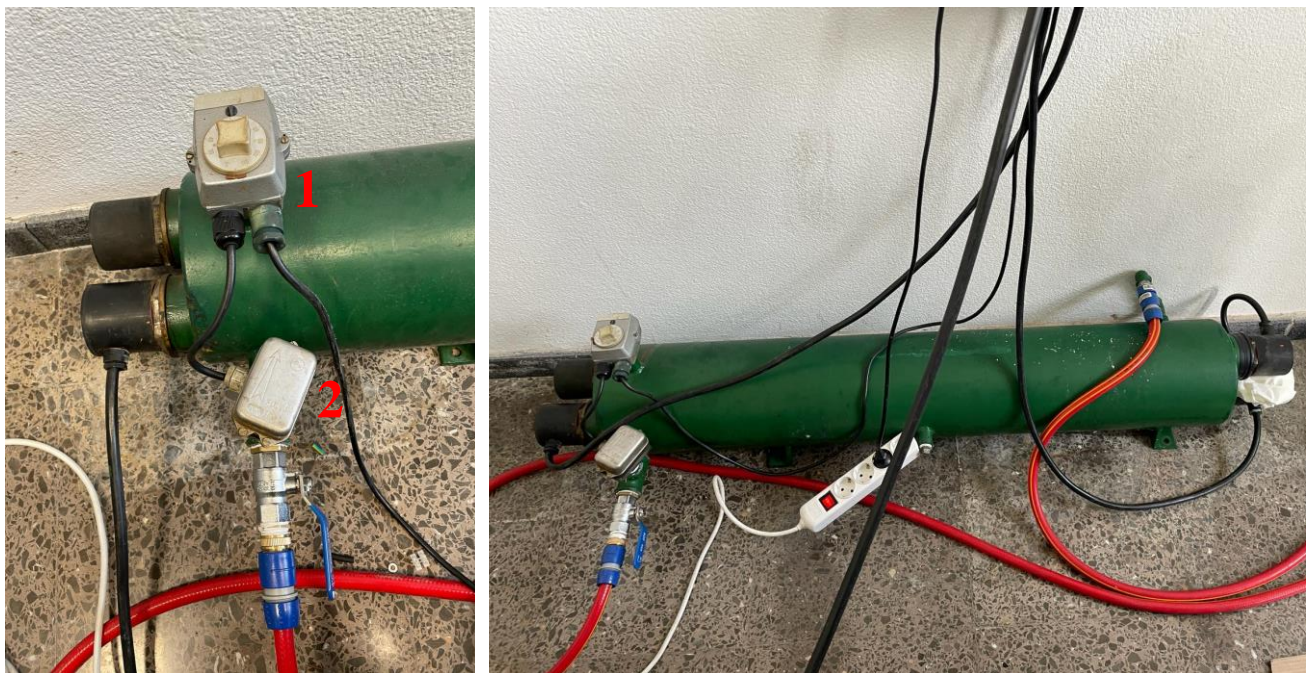


Figura 3-11: Cuadro eléctrico de control (a) y detalle de conexión de selector, bombillas y pulsador de seguridad (b) (autoría propia).

El circuito de refrigeración de las resistencias cuenta con un termostato (1) y un presostato (2) que se han conectado en serie al circuito de mando como sistema de seguridad. Ambos elementos están en el extremo de la resistencia como se puede ver en la *Figura 3-12* y están conectados en serie con el circuito de mando. De esta manera, en caso de que se alcance una temperatura excesiva o que no haya caudal de agua para refrigerar el conjunto de resistencias, el circuito se abrirá cortando la alimentación a las resistencias.



a)

b)

Figura 3-12: Conjunto de resistencias con termostato y presostato (a) y vista general (b) (autoría propia).

3.2 Combustibles

Para la realización de los ensayos se ha utilizado un diésel convencional e+ Neotech de la empresa Repsol cuya ficha se adjunta como documento anexo. Se trata de un gasóleo al que Repsol añade ciertos aditivos que, según la ficha, mejora el rendimiento de los motores diésel limpiando y protegiendo el sistema de alimentación de los motores. Ha sido adquirido en una estación de servicio Repsol. En un principio no se cree que vaya a tener un efecto diferente a cualquier otro diésel para los ensayos.

Para el biodiésel se va a utilizar uno adquirido a la empresa Bio-Oils Huelva, y su ficha también se adjunta como documento anexo. El origen del biodiésel es un 65% de residuos de los molinos de aceite de palma (POME) procedente de Indonesia y un 35% de aceites usados de cocina (UCOs).

Para realizar las diferentes mezclas se calculará la cantidad de cada combustible a utilizar con ayuda de una probeta de 1 litro y se mezclará en el depósito de combustible agitando la mezcla para asegurar una mezcla homogénea.

En la *Tabla 3-4* podemos ver las diferencias más destacadas en cuanto a características y pruebas de laboratorio.

Propiedad/Combustible	Repsol Diesel e+ Neotech	Biodiésel BioOils Huelva
Contenido en FAME (%)	7	97
Número de Cetano	51	≥ 51
Densidad a 15 °C (kg/m ³)	820-845	876,5
Contenido en azufre (mg/kg)	≤ 10	≤ 10
Viscosidad a 40 °C (mm ² /s)	2 - 4,5	4,571
Punto de inflamación (°C)	≥ 55	> 101

Contenido de agua (mg/kg)	≤ 200	400
Contaminación total partículas sólidas (mg/kg)	≤ 24	20,3

Tabla 3-4: Comparativa características de gasóleo tradicional y biodiésel.

Como el combustible de Repsol ya contenía un 7 % de biodiésel, la nomenclatura utilizada para los ensayos es referida a la proporción que se ha mezclado con el biodiésel adquirido en Bio-Oils, por lo que la proporción real de biodiésel quedaría como la reflejada en la *Tabla 3-5*.

Nomenclatura en trabajo	BO	B10	B20	B40	B60
Proporción real	7 %	16,3 %	25,6 %	44,2 %	62,8%

Tabla 3-5. Proporción de biodiésel utilizado con nomenclatura.



Figura 3-13: Indicación de proporción de biocombustible en surtidores de gasolinera (autoría propia).

3.3 Realización de los ensayos

3.3.1 Medición de emisiones.

Los ensayos se han realizado habiendo precalentado el motor haciéndolo funcionar durante 10 minutos. Transcurrido este tiempo el motor habrá alcanzado la temperatura de funcionamiento en el refrigerante (80 °C). A continuación, se comenzará a tomar las medidas deseadas siguiendo el esquema de la *Tabla 3-6* para cada una de las proporciones B0, B10, B20, B40 y B60.

Tiempo (min)	Carga (kW)	Acción
T + 0	0	Tomar datos y cambiar a 4 kW
T + 4	4	Tomar datos y cambiar a 8 kW
T + 8	8	Tomar datos

Tabla 3-6: Esquema de tiempos en ensayo

En la primera prueba realizada al generador metiéndolo en carga se encontró un problema a la hora de seleccionar las resistencias que consumían 12 kW, y es que el grupo no había sido probado nunca con un consumidor. A la hora de hacerlo funcionar con la máxima carga la temperatura de los gases de escape alcanzaban valores cercanos a los 400 °C. Esto hacía que la pintura con la que está pintado el sistema de escape (silencioso y protector) comenzase a humear sin llegar a arder. Se apreciaba un riesgo de incendio si se continuaba con el ensayo durante más tiempo por lo que se ha decidido hacer pruebas con el motor sin carga, con un consumidor de 4 kW y de 8 kW. Cabe destacar que la pintura con la que se cubrió el sistema de escape no es anticorrosiva ni específica para sistemas de escape, lo que hubiese evitado el problema. Este es el motivo por el que los ensayos se han realizado seleccionando las resistencias de 4 y 8 kW únicamente, junto con las mediciones del motor trabajando sin carga.

3.3.2 Cálculo de consumos.

Para la medición del consumo específico del motor utilizando cada combustible y para cada nivel de carga se ha hecho funcionar durante 6 minutos el motor en cada situación tomando los datos del peso de la balanza cada minuto para tener un total de 7 mediciones. Estos valores se registraban a través de un software conectado a la balanza electrónica y procesados en una hoja Excel. Al calcular la pendiente de la recta obtenida como resultado tenemos el dato del consumo de combustible para cada una de las situaciones en gramos por minuto (g/min).

Para aumentar la credibilidad de los datos se hizo un experimento de repetición en el que se midió el consumo con una de las situaciones posibles, en este caso, con 4 kW de carga y utilizando B40.

4 RESULTADOS.

4.1 Consumo de combustible

En este apartado se mostrarán los resultados de las mediciones de consumo de combustible en gramos por minuto (g/min) obtenidos gracias a la balanza digital y el software. Se ha realizado un experimento de repetición para una mayor credibilidad de datos, mostrándose los resultados obtenidos en los 5 ensayos en la *Figura 4-1*. Se realizaron con B40 y con una carga de 4 kW.

Ensayo 1		Ensayo 2		Ensayo 3	
Tiempo (minutos)	Consumo	Tiempo (minutos)	Consumo	Tiempo (minutos)	Consumo
0,00	0	0,00	0	0,00	0
1,08	20	1,23	24,6	1,13	21,4
2,08	40,7	2,23	52,6	2,20	46,2
3,05	62,7	3,23	77,4	3,17	70,1
4,10	90,7	4,33	101,2	4,20	95,7
5,13	111,7	5,35	125,9	5,17	119,3
6,07	139,7	6,25	144,2	6,25	147,6
Pendiente =	23,028	Pendiente =	23,508	Pendiente =	23,861
Ensayo 4		Ensayo 5			
Tiempo (minutos)	Consumo	Tiempo (minutos)	Consumo		
0,00	0	0,00	0		
1,22	21	1,22	28		
2,17	46,7	2,20	51,3		
3,20	69,8	3,47	77		
4,17	91,4	4,20	93,7		
5,18	117,7	5,17	117,8		
6,13	144,7	6,23	142,7		
Pendiente =	23,686	Pendiente =	23,113		

Tabla 4-1: Ensayos de repetición de consumo de combustible.

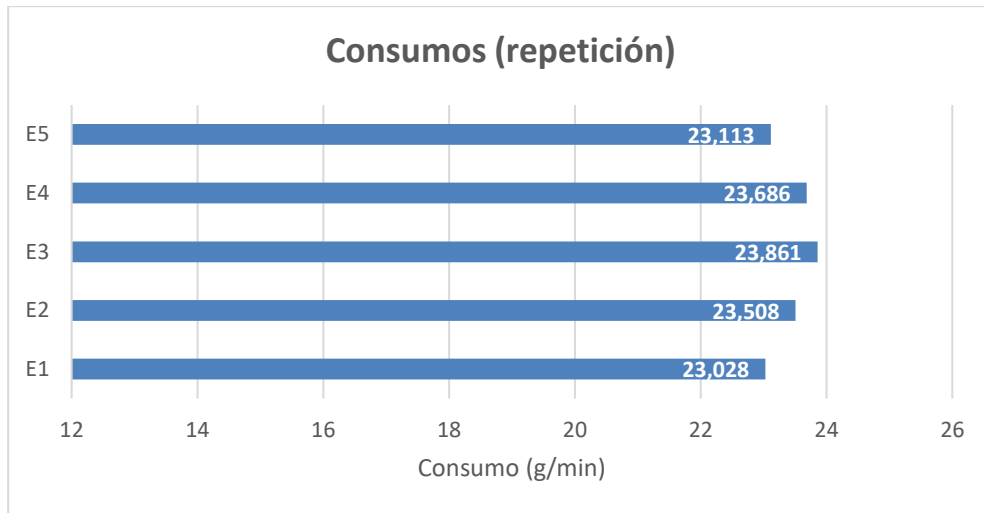


Figura 4-1: Comparativa de ensayos de repetición de consumo de combustible.

Como se aprecia en la *Tabla 4-1*, existen pequeñas diferencias entre los 5 ensayos para el mismo experimento de medición de consumo. La diferencia entre el mayor y menor resultado de consumo combustible es de 0,581 g/min, lo que supone un 3,49% del valor. El valor medio es de 23,439 y la raíz del error cuadrático medio según (4) es de 0,55.

$$NRMSE = \frac{1}{x_{max} - x_{min}} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2} \quad (1)$$

4.1.1 Consumo sin carga

Para el generador funcionando sin carga, se puede observar en la *Figura 4-2* que el motor funcionando con B10 es significativamente más eficiente que trabajando con diésel convencional (un 9,65%) y también para B20 (6,73%), mientras que se observa un aumento de combustible a partir de B40 de un 7,28% para B40 y de un 8,86% para B60.

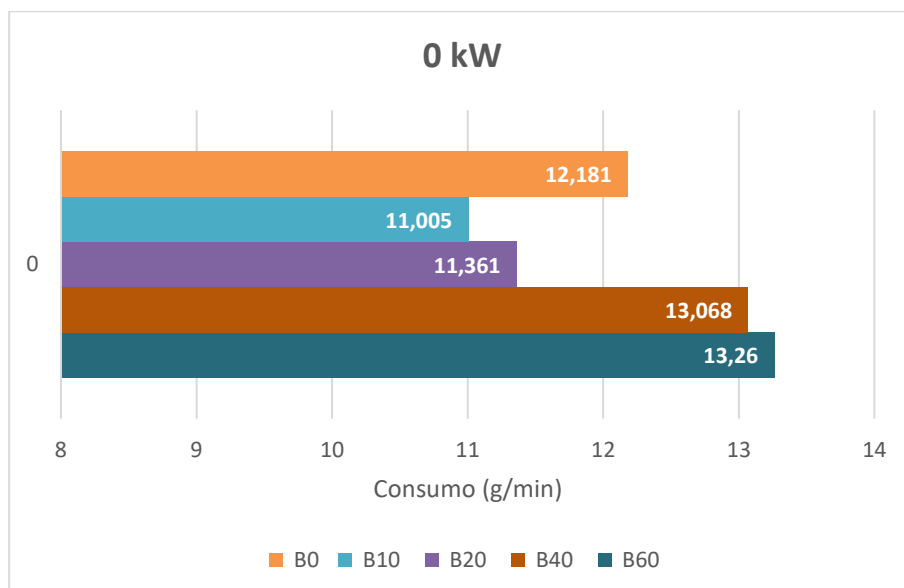


Figura 4-2 Consumo de combustible del generador trabajando sin carga para las diferentes mezclas.

4.1.2 Consumo con carga baja

Para el caso del generador trabajando con una carga baja de 4 kW, se observa en la *Figura 4-3* una reducción del consumo de combustible de un 12,62% a la hora de usar B10 respecto al gasóleo convencional. También son más eficientes el B20 y B40, 5,48% y 8,29% respectivamente, mientras que el B60 es un 2,38% más ineficiente.

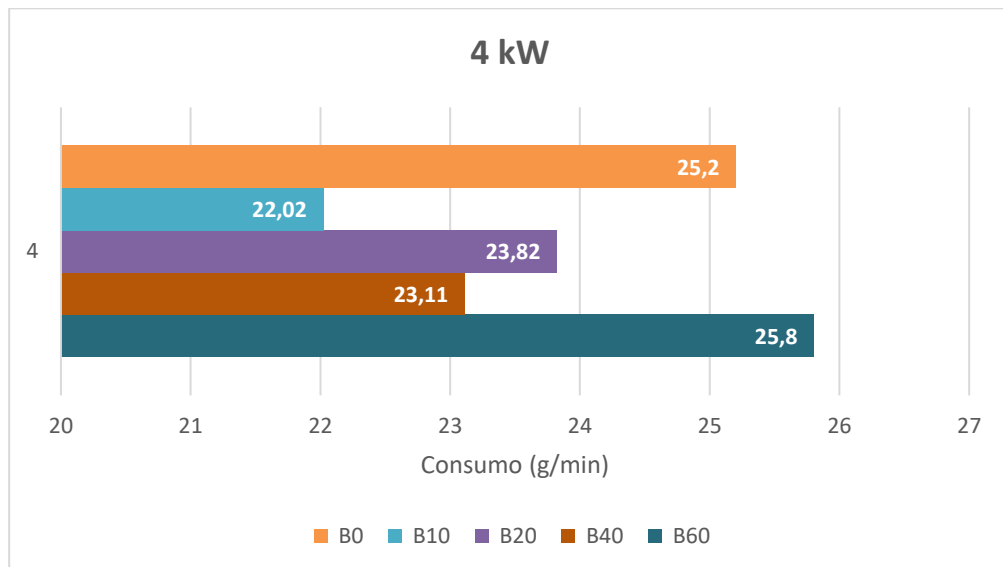


Figura 4-3: Consumo de combustible del generador trabajando a baja carga para las diferentes mezclas.

4.1.3 Consumo con carga media

Cuando hacemos funcionar el generador con una carga media de 8 kW se observa una reducción generalizada del consumo de combustible a la hora de usar biodiésel. La reducción es de un 18,62% para el B10, 13,51% para el B20, 12,03% para B40 y de un 5,29% si se utiliza B60.

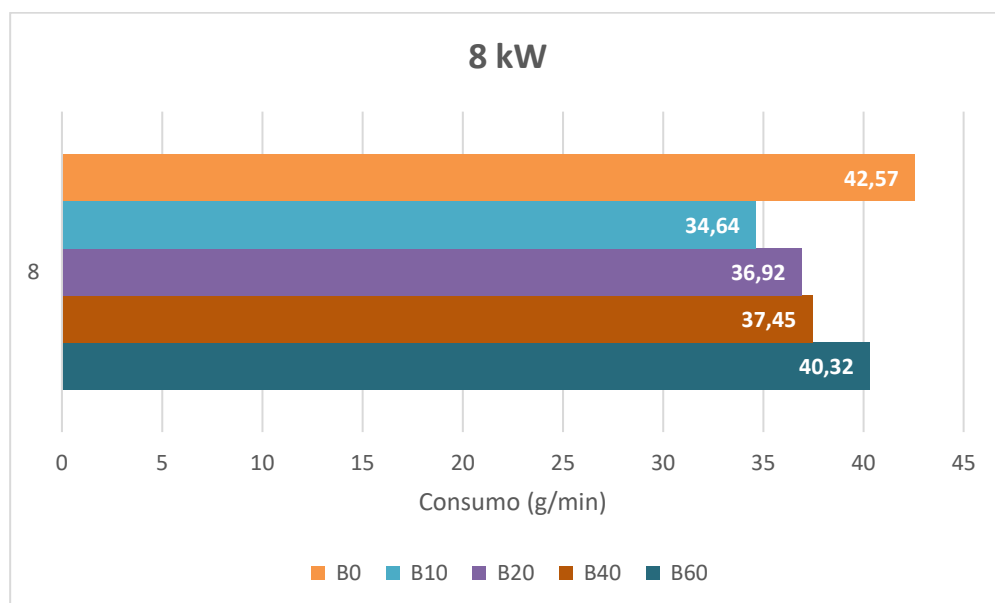


Figura 4-4: Consumo de combustible del generador trabajando a media carga para las diferentes mezclas.

4.1.4 Consumo comparado

En la *Figura 4-5* se puede ver que con bajas proporciones de biodiésel el grupo generador es más eficiente que utilizando diésel convencional. A medida que se aumenta la proporción de biocombustible, la eficiencia del grupo disminuye, especialmente con cargas bajas.

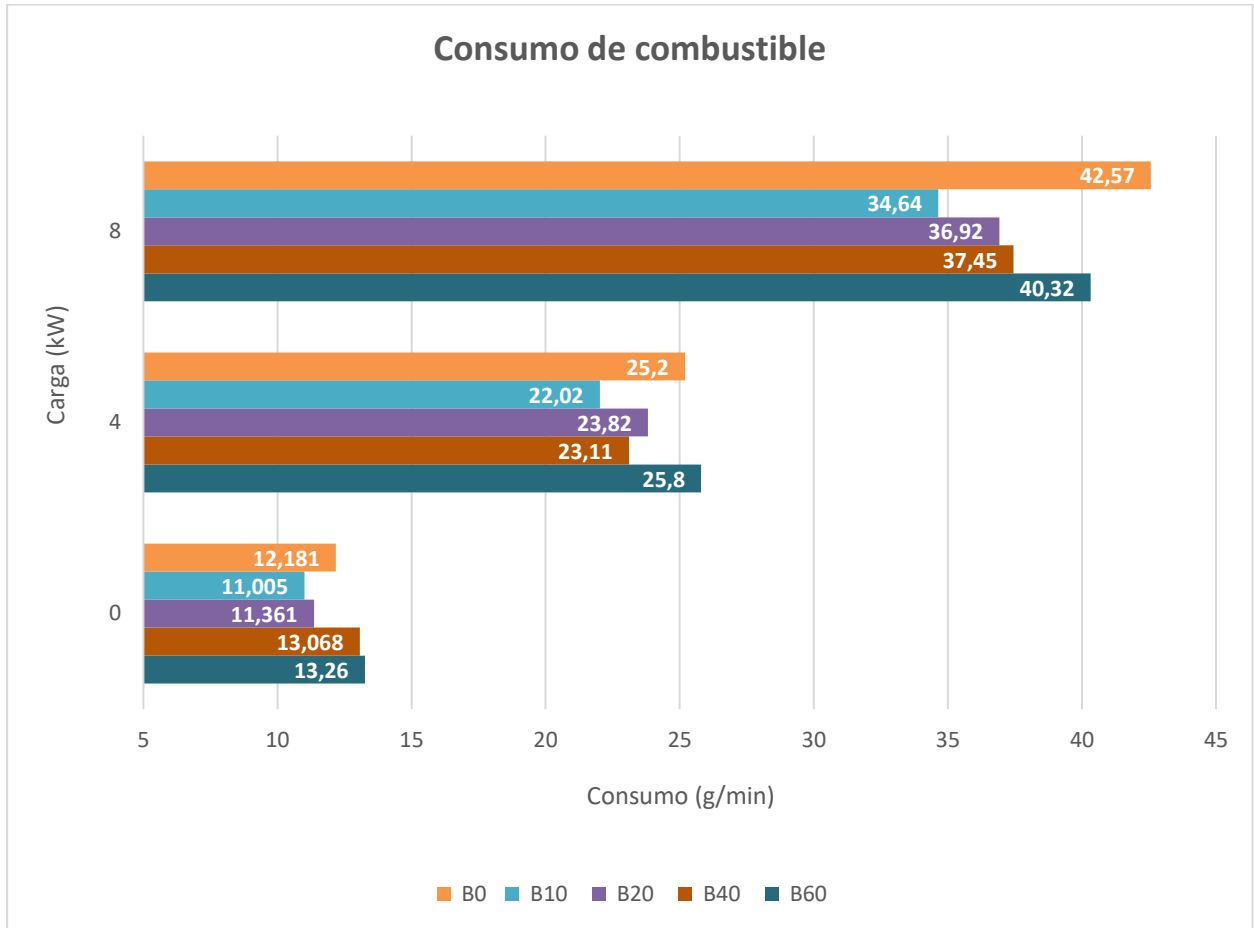


Figura 4-5: Consumo de combustible del generador trabajando a diferentes cargas y para las diferentes mezclas.

4.2 Emisiones

Para el caso de las emisiones se hicieron las mediciones para cada mezcla y nivel de carga obteniendo los siguientes resultados:

4.2.1 Emisiones para B0.

B0				
Parámetro/Carga	0 kW	4 kW	8 kW	12 kW
Tª gases (º C)	103	171	255	
O2 (%)	17,58	14,78	11,32	
CO (ppm)	0	0	0	
CO2 (%)	2,52	4,59	7,14	
NO (ppm)	86	184	302	
NOx (ppm)	90	193	317	
SO2 (ppm)	0	0	0	

Tabla 4-2: Emisiones de gases contaminantes para B0.

La Tabla 4-2 muestra los resultados de emisiones para B0 a diferentes cargas.

4.2.2 Emisiones para B10.

B10				
Parámetro/Carga	0 kW	4 kW	8 kW	12 kW
Tª gases (º C)	107	172	263	
O2 (%)	17,75	14,94	11,52	
CO (ppm)	0	0	0	
CO2 (%)	2,4	4,47	7	
NO (ppm)	70	177	294	
NOx (ppm)	74	186	309	
SO2 (ppm)	0	0	0	

Tabla 4-3: Emisiones de gases contaminantes para B10.

La Tabla 4-3 muestra los resultados de emisiones para B10 a diferentes cargas.

4.2.3 Emisiones para B20.

B20				
Parámetro/Carga	0 kW	4 kW	8 kW	12 kW
Tª gases (º C)	112	175	268	
O2 (%)	17,74	14,97	11,47	
CO (ppm)	0	0	0	
CO2 (%)	2,41	4,45	7,03	
NO (ppm)	86	191	311	
NOx (ppm)	90	201	327	
SO2 (ppm)	0	0	0	

Tabla 4-4: Emisiones de gases contaminantes para B20.

La Tabla 4-4 muestra los resultados de emisiones para B20 a diferentes cargas.

4.2.4 Emisiones para B40.

B40				
Parámetro/Carga	0 kW	4 kW	8 kW	12 kW
Tª gases (° C)	106,7	175,1	267,2	
O2 (%)	17,5	14,83	11,44	
CO (ppm)	0	0	0	
CO2 (%)	2,58	4,55	7,06	
NO (ppm)	91	188	306	
NOx (ppm)	96	197	321	
SO2 (ppm)	0	0	0	

Tabla 4-5: Emisiones de gases contaminantes para B40.

La Tabla 4-5 muestra los resultados de emisiones para B40 a diferentes cargas.

4.2.5 Emisiones para B60.

B60				
Parámetro/Carga	0 kW	4 kW	8 kW	12 kW
Tª gases (° C)	110,8	174,4	267,3	
O2 (%)	17,7	14,96	11,5	
CO (ppm)	0	0	0	
CO2 (%)	2,44	4,46	7,01	
NO (ppm)	96	191	317	
NOx (ppm)	101	201	333	
SO2 (ppm)	0	0	0	

Tabla 4-6: Emisiones de gases contaminantes para B60.

La Tabla 4-6 muestra los resultados de emisiones para B60 a diferentes cargas.

4.2.6 Comparativo Tª gases de escape.

Tª Gases	Carga (kW)		
	0	4	8
B0	103	171	255
B10	107	172	263
B20	112	175	268
B40	106,7	175,1	267,2
B60	110,8	174,4	267,3

Tabla 4-7: Comparativa Tª gases para diferentes mezclas.

En la Figura 4-6 se puede ver la comparativa de los valores de temperatura de los gases de escape, en los que se puede apreciar que no varían en gran medida, pero sí aumentan ligeramente a medida que se aumenta la proporción de biodiésel en la mezcla, estabilizándose a partir de B40.

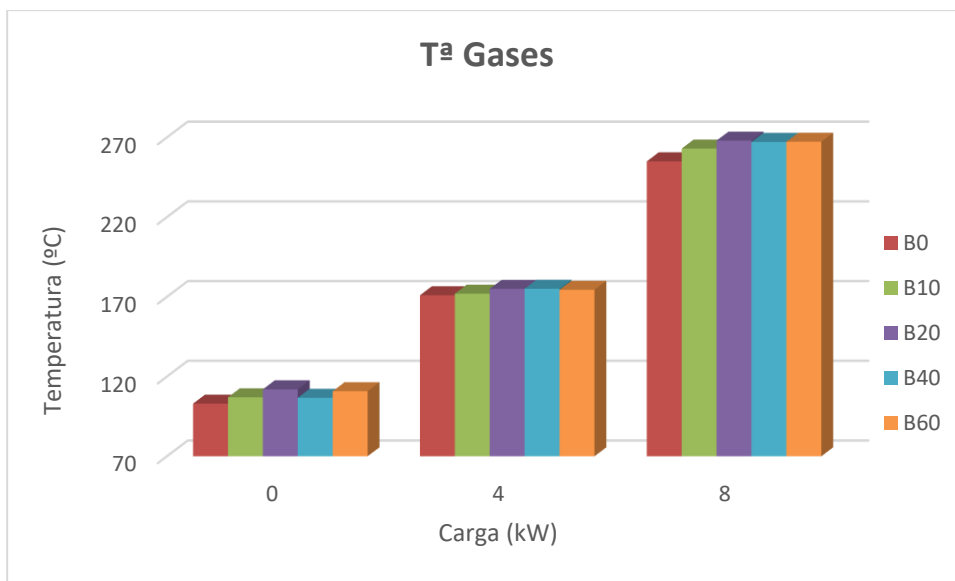


Figura 4-6: Comparativa Tª gases para diferentes mezclas.

4.2.7 Comparativo porcentaje de O₂.

O ₂ Mezcla	Carga (kW)		
	0	4	8
B0	17,58	14,78	11,32
B10	17,75	14,94	11,52
B20	17,74	14,97	11,47
B40	17,5	14,83	11,44
B60	17,7	14,96	11,5

Tabla 4-8: Comparativa de cantidad de oxígeno para diferentes mezclas.

En la Figura 4-7 podemos ver una comparativa de la cantidad de oxígeno que resulta de la combustión en las diferentes situaciones. Se observa un paralelismo en forma con el consumo de combustible, pero de forma inversa. Es decir, a mayor consumo, mayor cantidad de oxígeno reacciona con el mismo y menor cantidad sale como resultado.

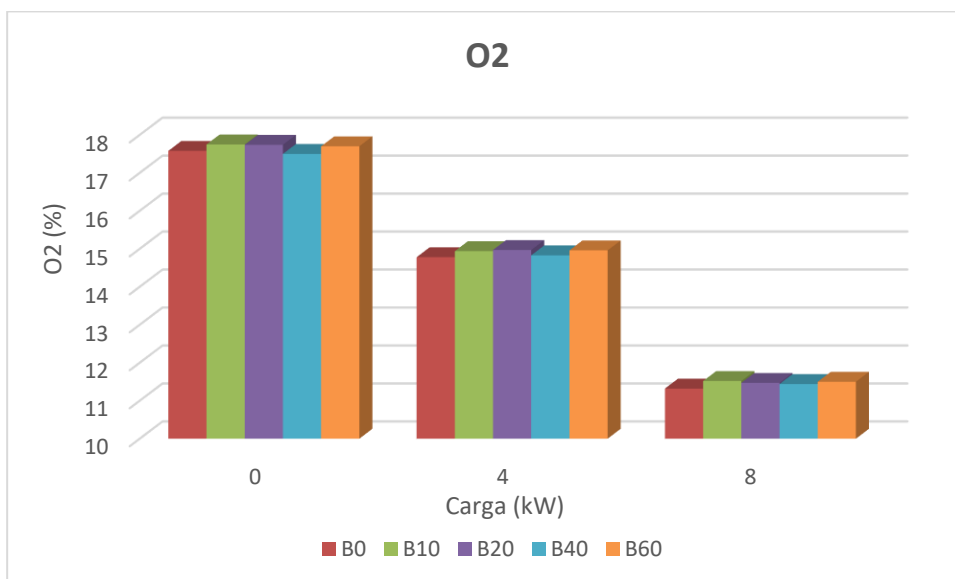


Figura 4-7: Comparativa de cantidad de oxígeno para diferentes mezclas.

4.2.8 Comparativo porcentaje CO₂.

CO2	Carga (kW)		
	0	4	8
Mezcla			
B0	2,52	4,59	7,14
B10	2,4	4,47	7
B20	2,41	4,45	7,03
B40	2,58	4,55	7,06
B60	2,44	4,46	7,01

Tabla 4-9: Comparativa de cantidad de dióxido de carbono para diferentes mezclas.

En la *Figura 4-8* se puede ver una comparativa de la cantidad de dióxido de carbono que resulta de los gases de escape. Cabe destacar que el uso de biodiésel en las proporciones en las que se ha ensayado reduce la emisión de este gas siempre y cuando trabaje bajo carga.

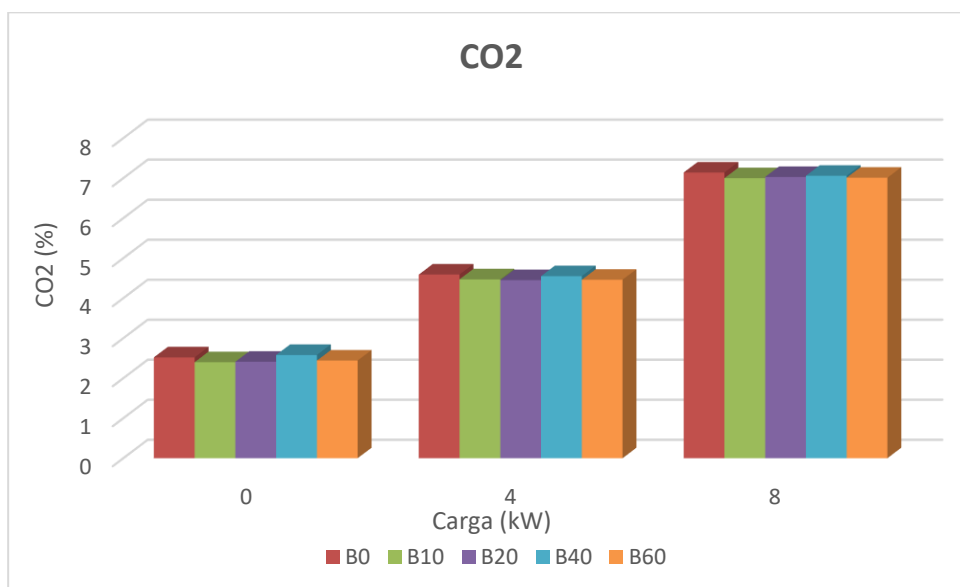


Figura 4-8: Comparativa de cantidad de dióxido de carbono para diferentes mezclas.

4.2.9 Comparativo nivel de NO.

NO	Carga (kW)		
	0	4	8
Mezcla			
B0	86	184	302
B10	70	177	294
B20	86	191	311
B40	91	188	306
B60	96	191	317

Tabla 4-10: Comparativa de nivel de NO para diferentes mezclas.

Si observamos los niveles de óxido nítrico emitidos para las diferentes situaciones en la *Figura 4-9*, se aprecia que todas las mezclas a partir de B10 aumentan los niveles del mismo. Para el caso de B60 y media carga (8 kW) aumenta en casi un 5%.

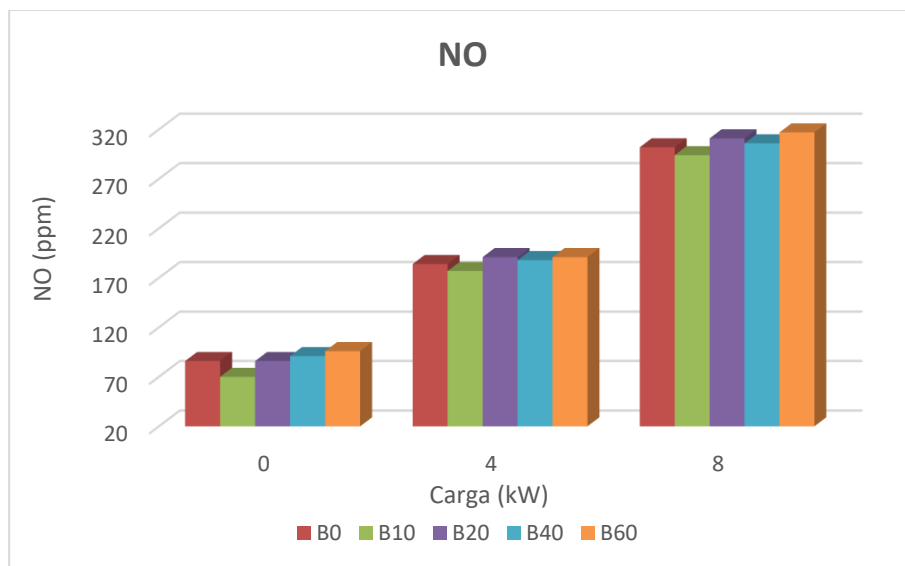


Figura 4-9: Comparativa de nivel de NO para diferentes mezclas.

4.2.10 Comparativo nivel de NOx.

NOx	Carga (kW)		
Mezcla	0	4	8
B0	90	193	317
B10	74	186	309
B20	90	201	327
B40	96	197	321
B60	101	201	333

Tabla 4-11: Comparativa de nivel de NOx para diferentes mezclas.

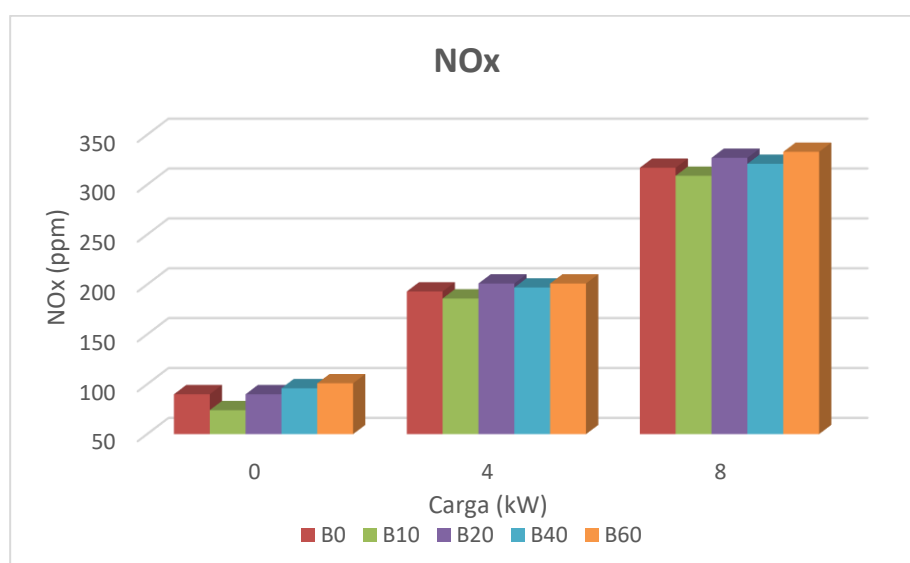


Figura 4-10: Comparativa de nivel de NOx para diferentes mezclas.

En cuanto el gráfico de óxidos de nitrógeno, siguen el mismo patrón que el óxido nítrico por ser generados de la misma forma y en condiciones similares.

4.3 Medidas para corregir el aumento de NO/NOx

Para intentar reducir las emisiones de NO y NOx para las mezclas con más cantidad de biodiésel se recurrió a una restricción del caudal de aire en la admisión. Esta es una de las medidas más fáciles a implementar de las muchas que hay. Se realizó el experimento con B40 y para 4 kW y 8 kW. Durante el ensayo se cerraba una válvula instalada en el conducto de admisión de aire.

4.3.1 B40 con 4kW y restricciones de aire de admisión.

	4 kW				
Parámetro/Caudal (m3/h)	100,5	99	93	86	84
Tª gases (° C)	179	174,7	180	181	182
O2 (%)	15	14,79	14,9	14,89	14,86
CO (ppm)	0	0	0	0	0
CO2 (%)	4,44	4,58	4,5	4,51	4,53
NO (ppm)	187	174	182	184	187
NOx (ppm)	196	183	191	193	196
SO2 (ppm)	0	0	0	0	0

Tabla 4-12: Emisiones del generador trabajando a baja carga y con B40 para distintas restricciones de caudal.

La Tabla 4-12 muestra los datos de emisiones para diferentes caudales de aire de admisión del generador trabajando a baja carga.

4.3.1.1 Comparativo temperatura gases de escape (°C)

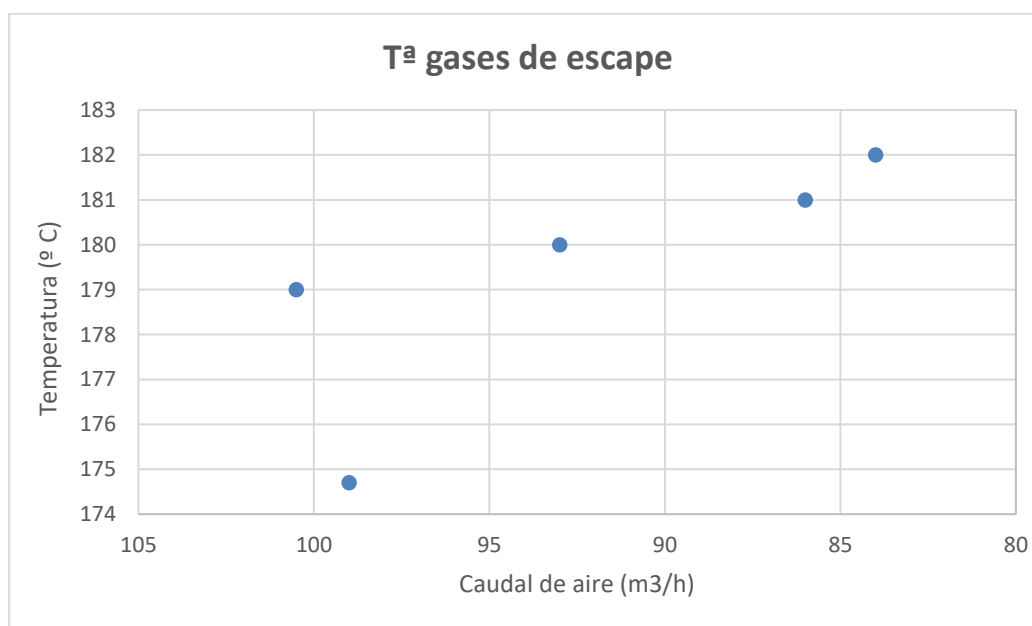


Figura 4-11: Comparativo temperatura de gases de escape para diferentes restricciones de aire de admisión.

En cuanto a la temperatura de gases de escape, se aprecia una reducción clara cuando se restringe ligeramente (un 1,5%) el caudal de aire de admisión.

4.3.1.2 Comparativo cantidad de O_2

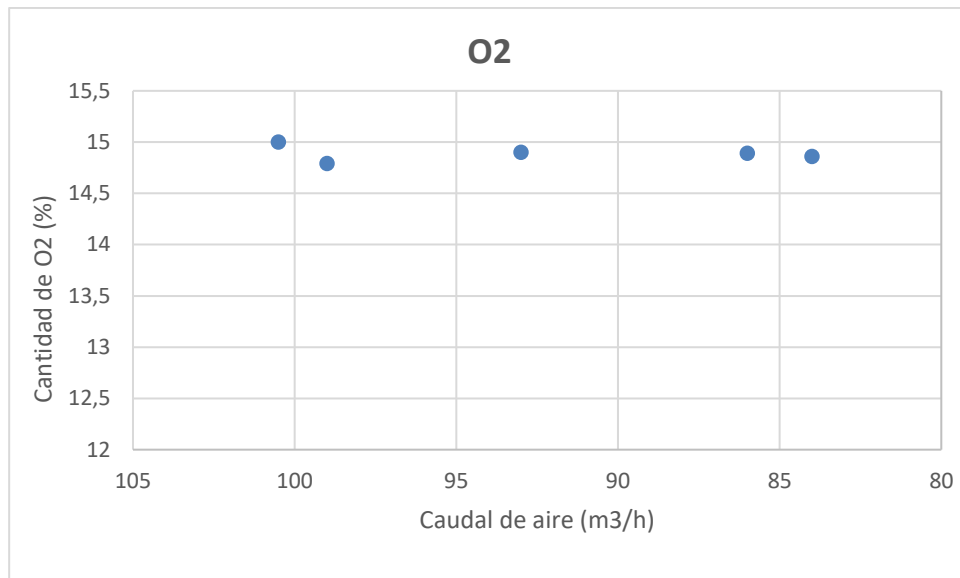


Figura 4-12: Comparativo cantidad de O_2 para diferentes restricciones.

Los valores de cantidad de oxígeno emitidos en los gases de escape no varían en gran medida, como muestra el Gráfico 12.

4.3.1.3 Comparativo cantidad de CO_2

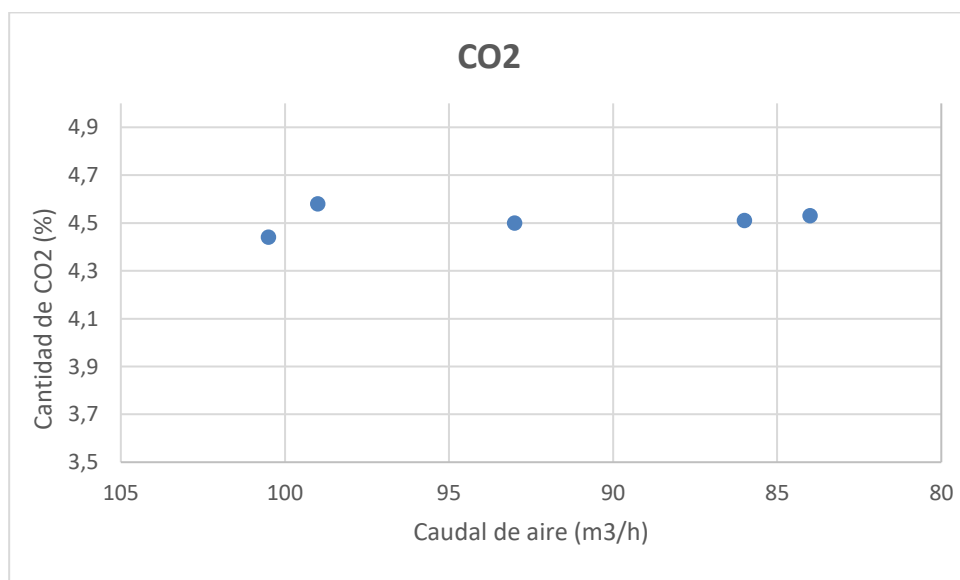


Figura 4-13: Comparativo cantidad de CO_2 para diferentes restricciones.

La cantidad de dióxido de carbono también se mantiene estable, aumentando ligeramente con la primera restricción, lo que nos hace suponer que el consumo de combustible también puede ser mayor.

4.3.1.4 Comparativo nivel de NO

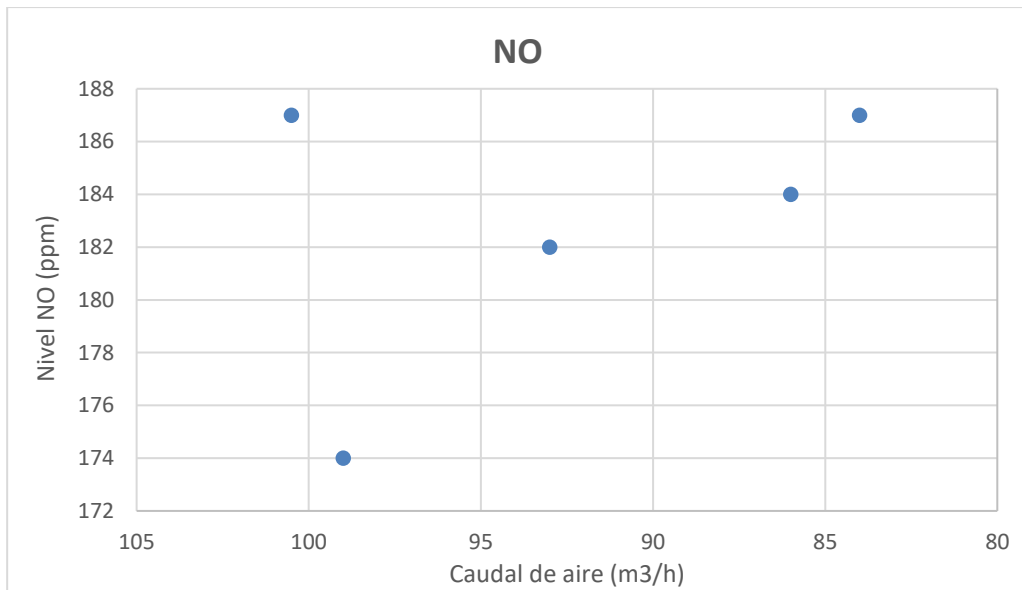


Figura 4-14: Comparativo nivel de NO para diferentes restricciones.

En el Gráfico 14 se muestra como con la pequeña restricción se pueden reducir los niveles de óxido nítrico en un 6,95% aunque se reducen también para mayores restricciones existe un punto en el que se dispara la temperatura de gases de escape y también los niveles de NO y NOx.

4.3.1.5 Comparativo nivel de NOx

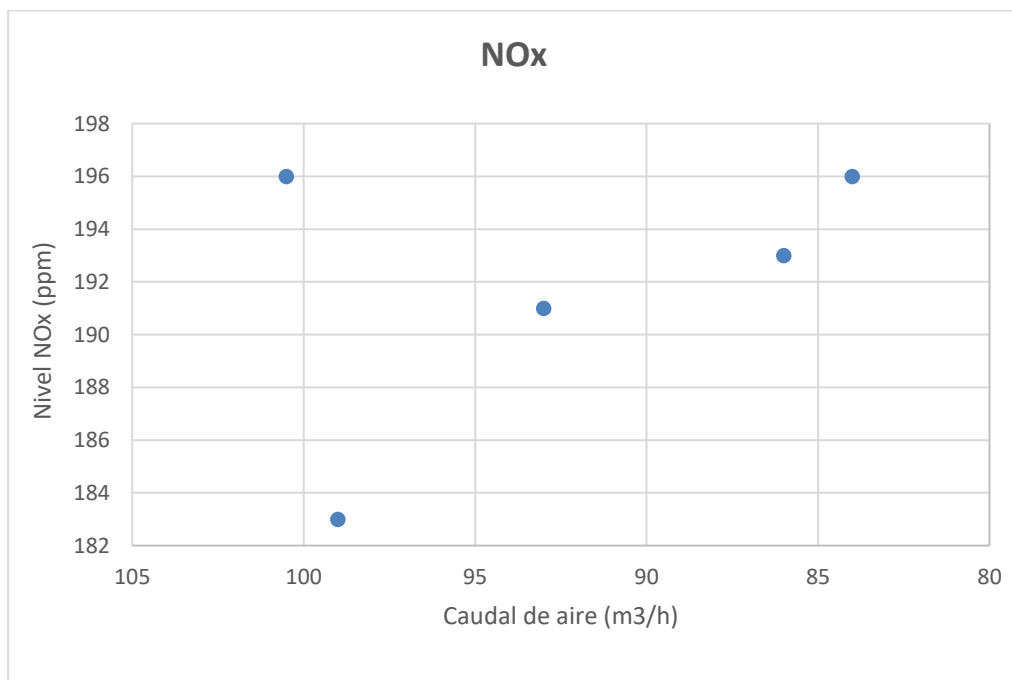


Figura 4-15: Comparativo nivel de NOx para diferentes restricciones.

Al igual que para el óxido nítrico, los NOx se ven reducidos cuando se restringe ligeramente el caudal de aire de admisión debido a la ligera reducción en la temperatura de los gases de escape.

4.3.2 B40 con 8 kW y restricciones de aire de admisión.

Parámetro/Caudal (m3/h)	8 kW			
	102,1	95,4	91,6	87,3
Tª gases (º C)	273,9	261,3	269,6	273,4
O2 (%)	11,73	11,73	11,71	11,65
CO (ppm)	0	0	0	0
CO2 (%)	6,84	6,84	6,86	6,9
NO (ppm)	305	293	303	306
NOx (ppm)	320	308	318	321
SO2 (ppm)	0	0	0	0

Tabla 4-13: Emisiones del generador trabajando a media carga y con B40 para distintas restricciones de caudal.

La Tabla 4-13 muestra los datos de emisiones para diferentes caudales de aire de admisión del generador trabajando a media carga.

4.3.2.1 Comparativo temperatura de gases de escape (º C)

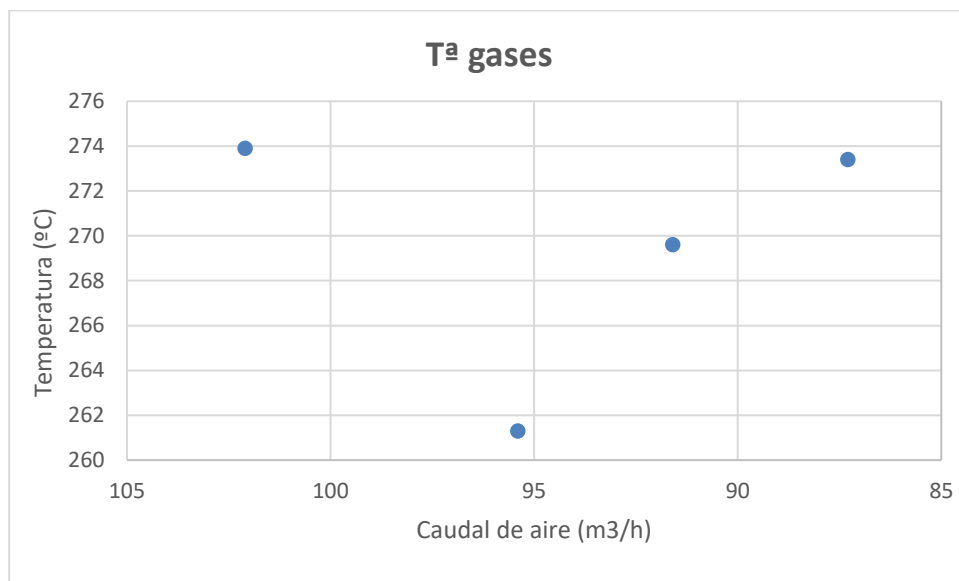


Figura 4-16: Comparativo temperatura de gases de escape para diferentes restricciones de aire de admisión.

La temperatura de los gases de escape se reduce sustancialmente con una pequeña restricción del caudal de aire de entrada, pero vuelve a subir hasta igualarse con una restricción del 14,5%.

4.3.2.2 Comparativo cantidad de O_2

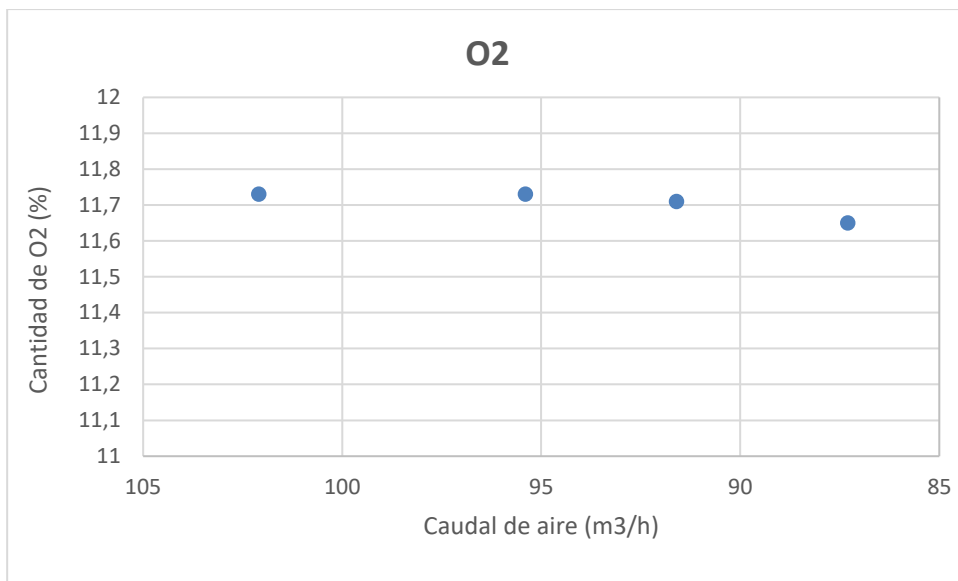


Figura 4-17: Comparativo cantidad de O_2 para diferentes restricciones de aire de admisión.

La cantidad de oxígeno en los gases de escape se mantiene sin variación hasta que se restringe el caudal más allá del 10% como podemos ver en el gráfico

4.3.2.3 Comparativo cantidad de CO_2

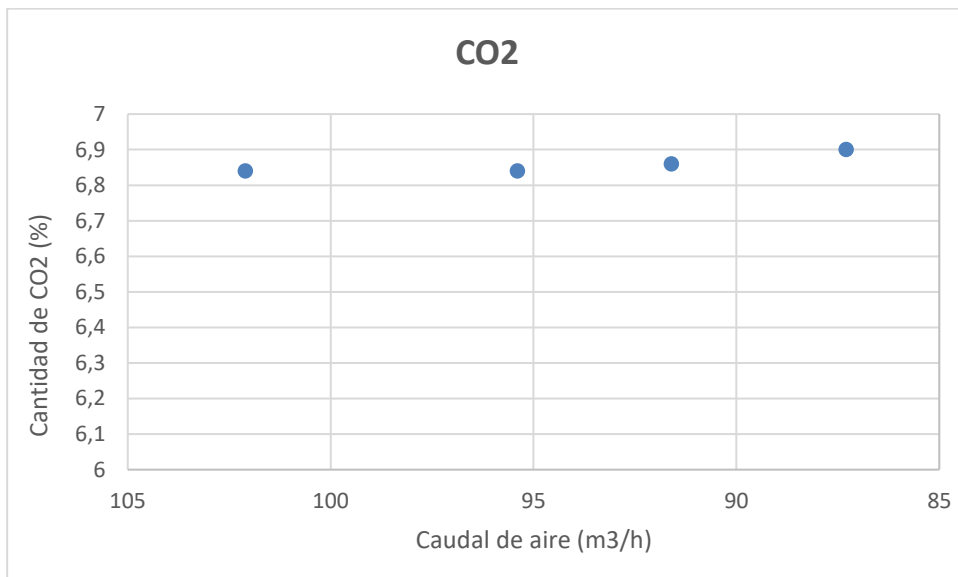


Figura 4-18: Comparativo cantidad de CO_2 para diferentes restricciones de aire de admisión.

La cantidad de dióxido de carbono emitida en los gases de escape se va a mantener estable, aumentando ligeramente a partir de una restricción del 10% de aire de combustión.

4.3.2.4 Comparativo nivel de NO

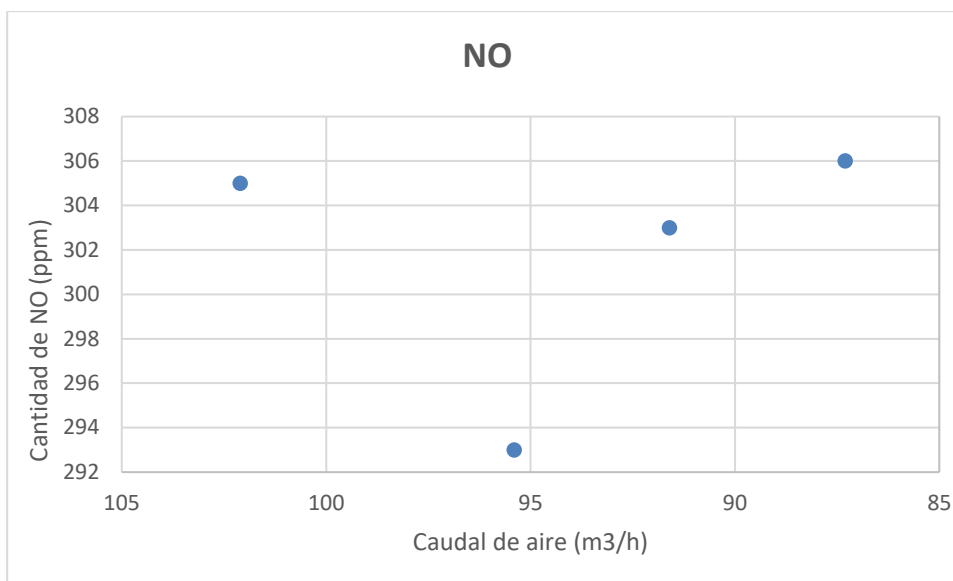


Figura 4-19: Comparativo nivel de NO para diferentes restricciones de aire de admisión.

En el Gráfico 19 se puede ver un descenso en los niveles de óxido nítrico del 3,93% para una pequeña restricción.

4.3.2.5 Comparativo nivel de NOx

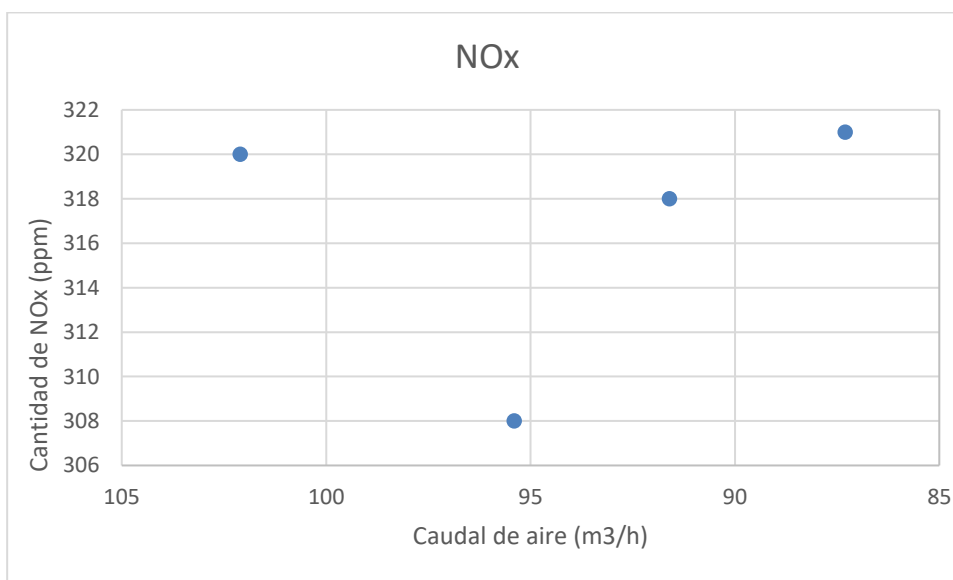


Figura 4-20: Comparativo nivel de NOx para diferentes restricciones de aire de admisión.

Al igual que el NO, para los NOx ocurre lo mismo y son reducidos en torno a un 4% cuando se restringe ligeramente el caudal de aire de entrada de la admisión.

5 DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.

5.1 Consumo de combustible

Para poder interpretar los resultados de consumo de combustible hay muchas variables que debemos tener en cuenta. La primera variable es que a diferencia del diésel convencional, el biodiésel es un combustible oxigenado, y ese contenido en oxígeno además de producir mucho menos hollín [25], genera una combustión más limpia y eficiente [7]. Esta primera variable sólo tiene importancia para proporciones bajas, ya que a medida que aumenta la cantidad de biocombustible otros factores cobran más importancia.

La temperatura pico que alcanza el combustible al entrar en ignición en el interior de la cámara de combustión es mayor y se alcanza de manera más prematura a medida que se aumenta la proporción de biodiésel [22]. Esto creará una buena temperatura para que el combustible se quemé por completo y de manera eficiente, pero afectará negativamente en las emisiones de NO_x como se puede ver más adelante. Este efecto creará un efecto de “falso adelanto en el tiempo de inyección” que no siempre es bueno para el rendimiento ni funcionamiento del motor. De nuevo, este hecho afecta en menor medida que otros.

El factor que afecta al rendimiento y consumo en mayor medida es la menor densidad energética del biodiésel respecto al del diésel convencional. Esto es la cantidad de energía que contiene cada unidad de masa de combustible. Como se comentó en 2.2.7 la densidad energética es en torno a un 11% menor que para el diésel procedente del petróleo. Esto hace que el consumo de combustible tienda a ascender para mezclas mayores a B40 y que este incremento se vea acrecentado a cargas altas. En el caso del motor del ensayo, la bomba mecánica está regulada por el número de revoluciones del motor. Independientemente de la carga a la que esté sometido el generador, el motor debe mantenerse a 1500 rpm para seguir generando tensión alterna a 50 hercios (algo crucial). Con un combustible menos denso energéticamente, la bomba debe inyectar más cantidad para poder mantener las revoluciones de trabajo del grupo electrógeno.

La densidad del biodiésel también es mayor que la del gasóleo tradicional, entre un 3,5% y un 6%. Esto hace que, a igualdad de caudal, se estará inyectando más cantidad de biodiésel que de diésel. De nuevo, este efecto se ve acrecentado a medida que aumentamos la proporción de biodiésel.

Otro factor que se suele pasar por alto es el módulo de compresibilidad, el cual suele ser mayor en el biodiésel. El adelanto en la inyección es beneficioso para el funcionamiento del motor siempre y cuando el pico de presión no se alcance antes del punto muerto superior porque supondría una pérdida drástica de rendimiento. Los motores con bomba de inyección convencional mecánica impulsan el combustible presurizándolo por el efecto de una leva a través de un conducto hasta el inyector. La presión del combustible es la que hace ceder al muelle de la aguja del inyector, produciéndose la inyección. Que

el biodiésel tenga un mayor módulo de compresibilidad se traduce en que la presión necesaria para hacer ceder el muelle del inyector y levantar la aguja se va a alcanzar ligeramente antes que con el diésel convencional que, recordemos, es el combustible para el que el motor se diseñó [23].

Esto explicaría los resultados obtenidos en el ensayo, donde el motor trabajando a baja carga y sin carga es más eficiente y, por tanto, consume menos cuando funciona con mezclas hasta B60, punto en el cual se igualaría el consumo al del diésel. A partir de cargas medias el punto en el que se iguala retrocede a mezclas inferiores al B40.

5.2 Emisiones

5.2.1 *Temperatura de gases de escape*

Lo descrito en 5.1 sobre el consumo de combustible justifica en gran medida el aumento de temperatura de gases de escape a medida que aumentamos la proporción de biodiésel. Este aumento está directamente relacionado a un pequeño adelanto de la inyección, así como de un pico de temperatura más prematuro que si utilizásemos diésel. Hay otro factor de importancia que hace aumentar la temperatura de los gases de escape y es la reducción de hollín y partículas sólidas producidas por el motor. La pérdida de calor a través de partículas sólidas como el hollín siempre va a ser mayor que si este hollín no se forma. De esta manera, las calorías que arrastraría el hollín quedan repartidas en el resto de gases y aumentan su temperatura [22].

En los ensayos se disponía de ningún medio para medir las partículas sólidas emitidas por el motor, pero se pudo observar que el residuo en el filtro del medidor de gases Testo era menor a medida que se subía la proporción de biocombustible para el mismo tiempo.

5.2.2 *Emisiones de CO₂*

La diferencia de emisiones de CO₂ es muy pequeña y no puede ser achacada a la proporción de biodiésel. Únicamente podemos asociar esta emisión a la combustión estequiométrica del combustible, por lo que a mayor carga, mayor consumo y mayor cantidad de CO₂ producido.

5.2.3 *Emisiones NO/NO_x*

Debido a que los niveles de NO y NO_x se han comportado de manera lineal entre ellos, serán interpretados de forma conjunta.

El aumento en los niveles de NO_x cuando se aumenta de proporción y carga es un efecto de varios factores que contribuyen a esto. Se puede apreciar que para B10 y para el motor que nos ocupa, en particular las emisiones de NO_x son sustancialmente más bajas, independientemente de la carga. Una mezcla de lo explicado en 5.1 sin que los efectos negativos del biodiésel cobren fuerza (recordemos la proporción) estarían detrás de esta reducción en las emisiones.

Desde B20 y para proporciones más ricas en biodiésel las temperaturas en el interior de la cámara de combustión empiezan a elevarse notablemente. Como se ha comentado en 5.1, la presión y por tanto la temperatura máxima dentro de la cámara de combustión se alcanzan antes que con el diésel convencional. Esto hace que el aire de dentro esté expuesto durante más tiempo a las altas temperaturas alcanzadas en el interior de la cámara de combustión. Si unimos esto a una reducción en la producción de hollín se generan unas condiciones muy favorables para la oxidación del nitrógeno molecular presente en el aire (78%) y la generación de “NO_x” térmico descrito en 2.4.1.

El mayor número de cetano en el biodiésel también favorece que la combustión se produzca con anterioridad en comparación al diésel. Si la combustión se produce de manera prematura, hay un mayor tiempo de exposición del aire de admisión y, por ende, del nitrógeno a las altas temperaturas que propician su oxidación y por tanto la generación de NOx.

5.2.4 Ensayos con restricción de aire de admisión

La primera medida para intentar corregir el aumento de NOx sin tener que recurrir a sistemas más complejos como los descritos en 2.4.3 (*EGR, SCR*) pasa por intentar restringir el caudal de aire de entrada de admisión. Esta es una medida que se podría aplicar fácilmente a un motor como el que nos ocupa, que trabaje a velocidad constante y con una carga de valores discretos y definidos. Simplemente tendríamos que estudiar el caudal que mejor funcione con cada situación de manera estacionaria. En el caso del grupo electrógeno del trabajo, la mejor opción sería restringir un 2% el caudal si va a trabajar a baja carga y un 6% cuando trabaje a media carga, como extraemos de la *Figura 4-14* y *Figura 4-19* de emisiones de NO. Con estas restricciones se ha conseguido rebajar ligeramente las emisiones de NO y NOx debido a que se reduce la cantidad de nitrógeno que entra en la cámara de combustión, y por tanto la cantidad que pueda reaccionar para formar óxidos de nitrógeno.

Si se trata de un motor en el que varía la velocidad y la carga de manera continua, esta restricción debería cambiar en cada momento. Algunos de los motores actuales de automoción llevan un sistema de colector de admisión de geometría variable. Este sistema varía la velocidad y caudal de aire en el colector de admisión haciéndolo pasar por un recorrido de distinta longitud antes de entrar en el cilindro. La conclusión de esto es que si se quiere implementar un sistema que restrinja el aire de admisión debe ser con una mariposa controlada electrónicamente y hacer un buen estudio de todas las situaciones posibles a las que se puede encontrar el motor, en revoluciones y en carga. El resultado será una lógica de control que controle esta mariposa según unos parámetros definidos como velocidad del motor, carga y temperatura de los gases de escape.

5.3 Limitaciones

A la hora de realizar los ensayos y pruebas del trabajo nos hemos encontrado una serie de limitaciones a las que hemos tenido que hacer frente.

La primera era el estado en el que estaba el grupo de resistencias, al que hubo que dedicar horas de trabajo para hacerlo funcionar de una manera segura. Llevaban mucho tiempo en el laboratorio y tenían una instalación eléctrica con conexiones de dudosa calidad. Aunque conseguimos hacerlas funcionar no pudimos solucionar una pequeña fuga de agua de refrigeración que tenía en uno de los extremos. La solución parcial fue vigilarla para evitar que mojase otros componentes eléctricos y usar papel para recoger la cantidad de agua que perdía.

Se encontraron bastantes fugas de combustible en las conexiones del circuito paralelo de combustible que se instaló para que funcionase con biocombustible. Esto es debido a la calidad de las abrazaderas que se compraron para realizar la instalación. Se solucionó poniendo más abrazaderas o poniéndolas con sumo cuidado en aquellas uniones por las que el combustible pasaba con más presión para intentar evitar que perdiese.

La mayor limitación fue encontrarnos con que no pudimos hacer pruebas del motor trabajando a cargas altas/máximas. Era un motor que nunca se había puesto en carga, por lo que ese problema no había surgido antes. Siendo un motor de 13,5 kW y sometiénolo a una carga de 12 kW la temperatura de los gases de escape eran tan altas (cerca de los 300 °C) que la pintura convencional con la que estaba pintado el tubo de escape comenzaba a humear intensamente en el primer tramo del tubo de escape. Esto conllevaba un riesgo de incendio debido a la duración de los ensayos que no podíamos asumir, por lo que se decidió no realizar ensayos seleccionando 12 kW.

Nos hubiese gustado realizar mediciones de partículas sólidas emitidas pero el analizador de gases Testo no permitía esta opción. Otra opción que nunca dio un valor distinto de 0 es el de nivel de monóxido de carbono. Desconocemos si por fallo del sensor o por error de configuración del aparato.

6 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

6.1 Conclusiones

Se ha analizado el funcionamiento del diésel generador bajo condiciones de distintas cargas y utilizando diferentes proporciones de biodiésel, apreciándose un correcto funcionamiento general en comparación con el funcionamiento del grupo funcionando con diésel convencional, sin ninguna limitación sobrevenida para su utilización.

Se ha logrado medir la cantidad de CO₂, O₂, NO y NO_x resultantes de la combustión del motor trabajando en las distintas condiciones de carga. Para el CO₂ y O₂ se obtuvieron los resultados esperados de emisiones, mientras que para NO/NO_x se observó un aumento progresivo a medida que se aumentaba tanto la carga como la proporción de biodiésel.

A la hora de medir el consumo de combustible se llega a la conclusión de que el máximo rendimiento del motor se alcanza con una mezcla B10 independientemente de la carga. Esto es específico para este motor, ya que se ha podido demostrar que esta proporción de biodiésel aumenta la eficiencia del motor, aunque aumenta ligeramente la temperatura de los gases de escape. Para cargas bajas y el motor trabajando sin cargas, a partir de B40 el motor es menos eficiente que con diésel original. Por el contrario, para cargas altas el motor es más eficiente y consume menos combustible con todas las proporciones de biodiésel probadas.

Gracias a la biografía consultada se ha podido interpretar el aumento de emisión de NO y NO_x explicado en el apartado 5.2.3 de discusión de resultados. Dicho aumento no es significativo como para evitar usar biodiésel como combustible, y menos teniendo en cuenta los sistemas de reducción de NO_x existentes hoy en día. El uso de biodiésel presenta muchas más ventajas que desventajas, por lo que es perfectamente viable su utilización para el motor probado.

Durante la realización de los ensayos no se ha observado ningún problema relacionado con el almacenamiento del biodiésel. El biocombustible se almacenó en un aula que rara vez bajó de 18 °C. Se dejaron las garrafas de combustible al lado de uno de los radiadores del aula por precaución, pero no se apreció ningún síntoma de congelación, oxidación o degradación del mismo por lo que no hubo que tomar medidas al respecto. La única ocasión en la que se observó una clara diferencia con el gasóleo fue a la hora de vaciar el filtro de combustible, ya que la viscosidad del biodiésel nos obligó a abrir el tornillo de purga del filtro para poder vaciarlo de combustible y no contaminar muestras de combustible entre sí.

El biodiésel es un biocombustible que presenta una gran cantidad de ventajas con respecto al diésel convencional. Se ha comprobado que es perfectamente compatible con el diésel generador del trabajo por lo que no hay ningún factor que haga que no se recomiende su uso. Otros motores con otras

tecnologías necesitan un estudio específico parecido al del presente trabajo para poder recomendar su funcionamiento con biodiésel.

Los resultados obtenidos en el presente trabajo nos hacen llegar a la conclusión de que el rendimiento y emisiones utilizando biodiésel son específicas de cada motor y situación. Los motores diésel actuales tienen una cantidad ingente de desarrollo específico para funcionar de la manera más eficiente posible utilizando diésel convencional. En el momento que se cambia ligeramente las propiedades del combustible se pierde eficiencia y se disparan las emisiones de NOx en el caso de utilizar biodiésel. El desempeño de cada motor utilizando biodiésel depende de las siguientes variables:

- Tipo de inyección del motor
- Tipo de aspiración (natural o sobrealimentada)
- Geometría del colector de admisión
- Diseño de la cámara de combustión
- Sistemas para la reducción de emisiones contaminantes
- Tipo de bomba de alimentación de combustible
- Temperatura del combustible
- Naturaleza de la materia prima utilizada para la producción de biodiésel
- Muchas otras...

Las variables de las que dependen las emisiones y la eficiencia de los motores son tantas que sería imposible generalizar y buscar un patrón de comportamiento para todos ellos, ya que a nivel constructivo hay diferencias entre ellos. La proporción de biodiésel ideal para un motor puede no ser la óptima para otro. Es por esto por lo que el funcionamiento y rendimiento de los motores funcionando con biodiésel deben ser estudiados de manera específica en cada caso.

6.2 Propuestas de mejora

El trabajo podría mejorarse con un medidor de gases más avanzado para poder medir partículas sólidas y monóxido de carbono (CO) de una forma precisa. Esto permitiría comparar un valor más y observar su comportamiento en las diferentes situaciones de carga y combustible.

La pintura con la que estaba recubierto el tubo de escape del grupo ha sido un factor limitante para la realización de ensayos debido a que no se podía hacer funcionar el motor con cargas altas o máximas. Esta limitación podría solucionarse de dos formas:

- Lijando/usando decapante para quitar la pintura existente y cubriendo el tubo con una pintura anticorrosiva específica para tubos de escape.
- Cambiando el tubo de escape actual por otro nuevo con una salida directa a la calle y no a una chimenea. Esto reduciría la contrapresión que hay actualmente debido a la longitud del tubo y los codos con ángulos cerrados que posee.

Se podría seguir subiendo la proporción de biodiésel hasta usar B100. En el caso del presente trabajo no se realizó por miedo a que se formasen depósitos o se pudiese obturar la bomba de inyección o los inyectores sin margen de tiempo para una reparación y no permitiendo acabar los ensayos del trabajo.

Otro valor muy interesante en la actualidad como es la cantidad de hollín que genera el motor funcionando con las distintas mezclas. La sonda del medidor Testo tiene unos filtros desechables donde se almacena el hollín para no dañar el resto de sensores. Se propone hacer los diferentes ensayos y pesar el filtro antes y después para saber la cantidad de hollín que genera cada uno. Obviamente habría que utilizar los filtros durante el mismo tiempo.

6.3 Líneas futuras

Como líneas futuras de investigación se podría tratar de solucionar el principal inconveniente encontrado a la hora de utilizar biodiésel, el aumento de NOx emitidos en los gases de escape.

Algunas de las medidas para reducir la cantidad de NOx sería la mencionada mariposa en el conducto de admisión con una lógica de control estudiada para la cada situación y motor. Otra opción sería instalar un sistema de EGR para recircular gases de escape hacia la admisión y rebajar el contenido de oxígeno y por lo tanto la temperatura dentro de la cámara de combustión, lo que reduciría la generación de NOx.

Un diseño de motor diésel con dos circuitos de alimentación de combustible paralelos también puede ser una opción interesante. Este tendría un circuito completo hasta el inyector para utilizar diésel convencional y otro para biodiésel. Lo ideal sería hacerlo con una bomba de inyección de dos etapas y que solo funcione la del combustible óptimo para cada situación. Una alternativa a este sistema sería utilizar los dos sistemas de alimentación pero que se uniesen a través de una electroválvula justo antes de la bomba de inyección de alta presión, aunque podría generar un *delay* desde que se ordene cambiar de combustible hasta que se produzca la transición del mismo.

Otra estrategia para intentar reducir las emisiones de NOx sería actuar sobre la calibración del motor, y más concretamente sobre el adelanto del tiempo de inyección. La manera de inflamarse del biodiésel dentro de la cámara de combustión hace que el máximo de presión y temperatura se alcance antes que si se utilizase diésel. Para contrarrestar el efecto de adelanto en el tiempo de inyección que genera el biodiésel se podría retrasar ligeramente dicho momento. En el motor que nos ocupa con bomba mecánica tradicional hace que se regule a través de la sincronización de la bomba con la posición del cigüeñal. En motores con inyección electrónica tan solo habría que ajustar los parámetros y la codificación de la unidad de control para retrasar ligeramente la inyección.

Como se ha visto durante el trabajo, los NO/NOx se generan mediante diferentes mecanismos y reacciones químicas. Estas reacciones dependen de la temperatura, por lo que conocer la temperatura del interior de la cámara de combustión nos podría ayudar a dilucidar con mayor precisión el mecanismo de generación de los NO/NOx. Medir la temperatura del interior de la cámara de combustión es un proceso complejo, y la mejor opción para este caso y que se puede aplicar a muchos otros motores consiste en un sensor de temperatura que se introduzca en lugar de la bujía de precalentamiento. Esta solución es la más económica fácil de aplicar. Se mediría la temperatura en uno de los cilindros en todo el ciclo de combustión mientras que se podría seguir realizando ensayos con diferentes cargas y mezclas de biodiésel.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] S. S. Fernández y J. R. Jusmet, «AGOTAMIENTO DE LOS COMBUSTIBLES FÓSILES Y EMISIONES DE CO₂: ALGUNOS POSIBLES ESCENARIOS FUTUROS DE EMISIONES», vol. 19, 2010.
- [2] «Graphics — Global Warming of 1.5 °C». Accedido: 24 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.ipcc.ch/sr15/graphics/>
- [3] «REGLAMENTO (UE) 2018/ 858 DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO - de 30 de mayo de 2018 - sobre la homologación y la vigilancia del mercado de los vehículos de motor y sus remolques y de los sistemas, los componentes y las unidades técnicas independientes destinados a dichos vehículos, por el que se modifican los Reglamentos (CE) n.o 715/ 2007 y (CE) n.o 595/ 2009 y por el que se deroga la Directiva 2007/ 46/ CE».
- [4] «Entregable.-Marco-Legal-WEB_REV.pdf». Accedido: 18 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.cetenma.es/wp-content/uploads/2018/12/Entregable.-Marco-Legal-WEB_REV.pdf
- [5] M. J. N. García y P. G. Triñanes, «Biocombustibles: bioetanol y biodiesel», *Univ. Santiago Compost.*, 2006.
- [6] L. F. Chuah *et al.*, «A review of performance and emission characteristic of engine diesel fuelled by biodiesel», *Chem. Eng. Trans.*, vol. 94, pp. 1099-1104, 2022.
- [7] A. C. P. D. Vicente, «Obtención de biodiesel por transesterificación de aceites vegetales: nuevos métodos de síntesis», 2012.
- [8] ASE CIEMAT: Yolanda Lechón, Israel Herrera, Carmen Lago y GA ETSIA UPM: Javier Sánchez López, Luis Romero Cuadrado, «Evaluación del balance de gases de efecto invernadero en la producción de biocarburantes», IDAE, Madrid, Técnico, 2011. [En línea]. Disponible en: https://www.idae.es/sites/default/files/documentos/publicaciones_idae/documentos_11227_e7_g_ei_biocarburantes_a_febef7a7.pdf
- [9] Truck & Engine Manufacturer's Association, «Technical Statement on the Use of Biodiesel in Compression Ignition Engines», p. 7, marzo de 2023.
- [10] Truck and Engine Manufacturers Association, «Truck and Engine Manufacturers Association Facts You Should Know About Biomass-Based Diesel Fuels», p. 8, marzo de 2023.
- [11] H. P. M. Montalvo, D. P. P. Maigua, y L. A. S. Correa, «Evolución e historia de los motores diesel», *Polo Conoc.*, vol. 7, n.º 10, pp. 744-760, 2022.
- [12] V. M. T. Vargas, D. F. B. Mayorga, M. P. F. Álvarez, y J. P. C. Espinoza, «Los biocombustibles como alternativa de energía a partir de recursos renovables y/o desechos», *Polo Conoc.*, vol. 7, n.º 7, pp. 386-407, 2022.
- [13] M. Lapuerta, O. Armas, y J. Rodríguez-Fernández, «Effect of biodiesel fuels on diesel engine emissions», *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 34, n.º 2, pp. 198-223, 2008.

- [14] R. L. McCormick, M. S. Graboski, T. L. Alleman, A. M. Herring, y K. S. Tyson, «Impact of biodiesel source material and chemical structure on emissions of criteria pollutants from a heavy-duty engine», *Environ. Sci. Technol.*, vol. 35, n.º 9, pp. 1742-1747, 2001.
- [15] P. N. Benjumea, Á. M. Álvarez, y A. P. Molina, «Predicción del efecto de la temperatura sobre la viscosidad del biodiesel de aceite de palma y sus mezclas con diesel convencional», 2006.
- [16] «BIOCARBURANTES-2022.pdf». Accedido: 3 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.appa.es/wp-content/uploads/2023/12/BIOCARBURANTES-2022.pdf>
- [17] Transport & Environment, «Billions wasted on biofuels», Brusels, jun. 2022. [En línea]. Disponible en: https://www.transportenvironment.org/wp-content/uploads/2022/06/202206_Billions_wasted_on_biofuels_TE.pdf
- [18] «Transport & Environment - Campaigning for cleaner transport in Europe», Transport & Environment. Accedido: 3 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.transportenvironment.org/>
- [19] R. G. s.r.o, «Tecnología de inyección diesel: tipos de bombas de inyección», AutoNorma. Accedido: 2 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.autonorma.es/blog/post/27-tecnologia-de-inyeccion-diesel-tipos-de-bombas-de-inyeccion>
- [20] bcnpress, «¿Qué diferencias hay entre las normas Euro 6 y Euro 7?», GreenChem. Accedido: 2 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://es.greenchem-adblue.com/diferencias-entre-normas-euro6-y-euro-7/>
- [21] «How SCR Technology Works». Accedido: 4 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.everbluesolution.com/blog/how-scr-technology-works_b3
- [22] C. J. Mueller, A. L. Boehman, y G. C. Martin, «An experimental investigation of the origin of increased NOx emissions when fueling a heavy-duty compression-ignition engine with soy biodiesel», *SAE Int. J. Fuels Lubr.*, vol. 2, n.º 1, pp. 789-816, 2009.
- [23] J. P. Szybist, S. R. Kirby, y A. L. Boehman, «NO x emissions of alternative diesel fuels: a comparative analysis of biodiesel and FT diesel», *Energy Fuels*, vol. 19, n.º 4, pp. 1484-1492, 2005.
- [24] C. Sánchez Terrazas, «Reducción de las emisiones de NOx en motores diesel mediante la tecnología de reducción selectiva catalítica (SCR)», 2016.
- [25] Y. Zhang y A. L. Boehman, «Impact of biodiesel on NO x emissions in a common rail direct injection diesel engine», *Energy Fuels*, vol. 21, n.º 4, pp. 2003-2012, 2007.

ANEXO I: IMPLICACIONES SOCIALES, Y/O ECONÓMICAS, Y/O AMBIENTALES

El uso de biocombustibles como el biodiésel tienen un impacto ambiental significativo sobre nuestro entorno y sobre nuestro planeta. Combustibles como el biodiésel hacen que el balance neto del ciclo del carbono sea cercano a neutro, por lo que la emisión de gases de efecto invernadero como el CO₂ se reduciría en casi un 100%. La utilización de este biocombustible se ha visto que en algunos casos reduce la emisión de NO y NO_x, así como el consumo de combustible. La materia prima con la que se produce el biodiésel son ácidos grasos de procedencia animal o vegetal. Esto unido al proceso de transesterificación al que se someten para convertirlos en biodiésel hacen que sean 100% biodegradables, y que a diferencia del diésel convencional pueda dañar gravemente el medio si se produjese un vertido. Por último, el camino del ser humano hacia la descarbonización de los procesos pasa por encontrar alternativas que nos hagan dejar a un lado la dependencia del petróleo, y los biocombustibles compatibles con tecnologías existentes son una de las mejores maneras.

En el plano económico, en la actualidad los biocombustibles siguen siendo ligeramente más caros que los combustibles tradicionales en Europa. Esto se debe principalmente a que gran parte de la materia prima necesaria para producirlos debe ser importada, lo que eleva los costes de producción. En países de Sudamérica como Brasil, biocombustibles como el bioetanol tienen un precio que compite directamente con el de la gasolina, incluso siendo el del bioetanol inferior en muchos casos. La realidad es que en el mercado europeo si no hay subvenciones hasta igualar el precio del biodiésel al del diésel, este no podrá jugar con el factor económico como uno de sus atractivos.

En el plano social, los biocombustibles en general y el bioetanol en particular puede ser una oportunidad de desarrollo de las zonas rurales y despobladas de cualquier país europeo. La producción en los campos de cultivos necesarios para satisfacer de materia prima a este sector en auge podría generar una reestructuración de las inversiones haciendo mucho más atractivas las de entidad nacional. La apuesta por este sector frenaría el éxodo rural que estamos viviendo y generaría nuevas oportunidades tanto a la población más joven como a la más pudiente con inversiones rentables. La eliminación de la dependencia del petróleo hacia combustibles más “verdes” es un proceso complejo que debe hacerse teniendo en cuenta todos los factores. Esta transición debe hacerse contando con el conocimiento y la disposición de los sectores primario y secundario, o de lo contrario podría fallar, ya que sería un cambio muy trascendental en nuestra sociedad.

El uso del biodiésel como combustible sustitutivo al gasóleo es un paso intermedio a la espera de tener una alternativa real de movilidad verde. Apostar por una alternativa que no termina de convencer a las empresas ni usuarios como el hidrógeno o el vehículo eléctrico generaría ingentes cantidades de residuos difícil de reciclar. La utilización de un combustible con impacto mínimo sobre la cantidad de CO₂ puede alargar la vida útil del parque móvil (mayoritariamente diésel en España), así como calderas y equipos de generación de electricidad. Alargar la vida útil de estos equipos evitaría realizar una inversión por una alternativa que supusiese un riesgo, especialmente para las clases sociales menos pudientes.

ANEXO II: REFLEXIONES ÉTICAS Y SOCIALES

La utilización de medios alternativos de propulsión o, como ese el caso, un combustible alternativo utilizando una tecnología ya existente no involucra al usuario ni diseñador en ningún dilema de carácter ético o moral. La investigación en este campo tiene como fin la búsqueda de una alternativa más respetuosa con el medio ambiente que el combustible utilizado hasta ahora.

El usuario o consumidor de productos como los biocombustibles no se enfrenta a un debate de carácter ético a la hora de comprarlo o consumirlo, sino que tienen otras razones de carácter económico, medioambiental o puramente técnicos.

La utilización de biocombustibles como el biodiésel no presentan ningún riesgo para la salud si se toman las medidas de seguridad oportunas. Estas medidas de seguridad no difieren mucho de las que hay que tener a la hora de trabajar con combustibles tradicionales.

ANEXO III: NORMATIVA EUROPEA Y AMERICANA DE ESTÁNDARES DE CALIDAD PARA BIODIÉSEL.

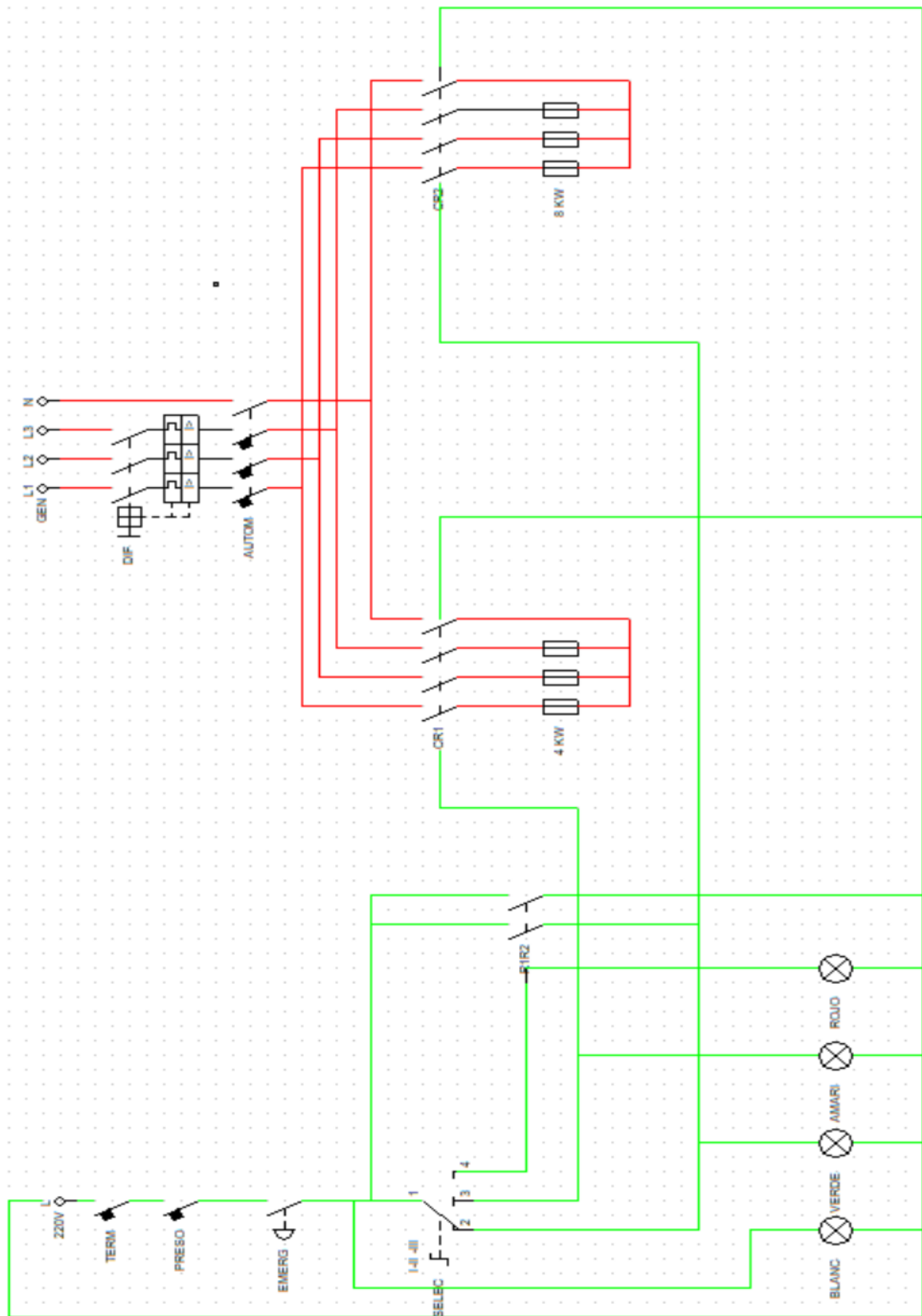
Tabla 1. Norma astm para biodiésel D6751-09				
Propiedad	Límite		Unidad	Método de prueba
	Min	Max		
Punto de inflamación	93		°C	D 93
Control de alcohol Debe cumplir con una de las siguientes: 1. Contenido de metanol 2. Punto de inflamación	130	0,2	masa % °C	en 14110 D93
Agua y sedimento		0,050	% volumen	D2709
Número ácido		0,50	mg KOH / g	D664
Ceniza sulfatada		0,020	% masa	D874
Corrosión lámina de cobre		No. 3		D130
Residuo de carbono		0,050	% masa	D4530
Viscosidad cinemática	1.9	6,0	mm ² /s	D445
Número de cetano	47			D613
Punto de turbidez		Reporte	°C	D2500
Filtrabilidad de impregnado en frío		360	Segundos	Anexo A1
Estabilidad de oxidación	3		horas	en 14112
Glicerina libre		0,020	% masa	D6584
Glicerina total		0,240	% masa	D6584
Sodio y potasio, combinados		5	ppm (µg/g)	en 14538
Calcio y magnesio, combinados		5	ppm (µg/g)	en 14538
Azufre*		0,0015 0,05	% masa (ppm)	D5453
Contenido de fósforo		0,001	% masa	D4951
Temperatura destilación, Temperatura atmosférica equivalente, 90% recuperado		360	°C	D1160

* Diferentes límites de azufre para S15 (15 ppm azufre) y S500 (500 ppm azufre combustible).

Tabla 2. Norma Europea para Biodiésel en 14214 – 2008				
Propiedad	Límite		Unidad	Método de prueba
	Min	Max		
Contenido de éster	96.5			en 14103
Punto de inflamación	101		°C	en iso 2719 en iso 3679
Contenido de metanol		0.20	% (m/m)	en 14110
Contenido de agua		500	mg/kg	en iso 12937
Valor ácido		0.50	mg KOH / g	en 14104
Ceniza sulfatada		0.02	% (m/m)	iso 3987
Corrosión lámina de cobre	No. 1			en iso 2160
Residuo de carbono (10% residuo dist.)		0.30	% (m/m)	en iso 10370
Contaminación total		24	mg/kg	en 12662
Densidad a 15°C	860	900	kg/m ³	en iso 3675 en iso 12185
Viscosidad cinemática	3.5	5.0	mm ² /s	en iso 3104
Número de cetano	51			en iso 5165
Estabilidad de oxidación, 110°C	6		horas	en 14112
Glicerina libre		0.020	% (m/m)	en 14105 en 14106
Glicerina total		0.240	% (m/m)	en 14105
Contenido de monoglicéridos		0.80	% (m/m)	en 14105
Contenido de diglicéridos		0.20	% (m/m)	en 14105
Contenido de triglicéridos		0.20	% (m/m)	en 14105
Índice de yodo		120	g yodo / 100 g	en 14111
Contenido de ácido linoléico		12	% (m/m)	en 14103
Contenido de fame con ≥ 4 enlaces dobles		1	% (m/m)	
Metales Grupo I (Na + K)		5	mg/g	en 14108 en 14109 en 14538
Metales Grupo II (Ca + Mg)		5	mg/g	en 14538
Azufre		10	mg/kg	en iso 20846 en iso 20884
Contenido de fósforo		4	mg/kg	en 14107

ANEXO IV: ESQUEMA ELÉCTRICO DEL CONJUNTO DE RESISTENCIAS

Se muestra el circuito de mando (verde) y el circuito de fuerza (rojo).



ANEXO V: FICHA ESPECIFICACIONES DE DISEÑO REPSOL E+ NEOTECH

CARACTERÍSTICAS	LÍMITES		UNIDADES	ENSAYOS
	Mín.	Máx.		
Número de cetano	51		-	EN ISO 5165/15195 ASTM D613
Índice de cetano	46		-	EN ISO 4264 ASTM D4737
Densidad a 15°C	820	845	kg/m ³	EN ISO 3675/12185 ASTM D4052
Hidrocarburos policíclicos aromáticos		8	%m/m	EN 12916
Contenido en azufre		10	mg/kg	EN ISO 20846/20884 ASTM D5453
Destilación • 65% recogido • 85% recogido • 95% recogido	250	350 360	°C	EN ISO3405 ASTM D86
Viscosidad cinemática a 40°C	2,000	4,500	mm ² /s	EN ISO3104 ASTM D445
Punto de inflamación	Superior a 55		°C	EN ISO2719 ASTM D93
Punto de obstrucción de filtro frío • Invierno • Verano		-10 0	°C	EN 116
Residuo carbonoso (10% v/v residuo de destilación)		0,30	%m/m	EN ISO 10370 ASTM D4530
Lubricidad. Diámetro de huella corregido (Wsd1,4) a 60°C		460	µm	EN ISO 12156-1
Contenido en agua		200	mg/kg	EN ISO 12937
Contaminación total (partículas sólidas)		24	mg/kg	EN 12662
Contenido de cenizas		0,01	%m/m	EN ISO 6245 ASTM D 482
Corrosión lámina de cobre (3h. a 50°C)		Clase 1	Escala	EN ISO 2160 ASTM D130
Color		2		ASTM D1500
Contenido en FAME		7	%v/v	EN 14078
Transparencia y brillo	Cumple			ASTM D 4176
Detergencia	>30%		Mejora gasóleo base	CEC-F23-01
	>70%		Mejora sobre base	CEC-F98-08
Estabilidad	<25		g/m ³ insolubles	ASTM D 2274, EN ISO 12205
	<25		g/m ³ insolubles	ASTM D 2274 + Cu
	>35		horas período inducción	EN 15751
	>65		minutos período de inducción	EN 16091
Separación de agua	<25		g/m ³ insolubles	ASTM D 4625
	<2		Interfase y separación	ASTM D 1094
Propiedades antiherrumbre		A	Clasificación NACE	ASTMD 665 A y B
Capacidad antiespumante		>60% (<15 s)	Mejora gasóleo base (espumas)	NF M 07-075
Aditivos y agentes trazadores	Regulados por la Orden PRE/1724/2002, de 5 de julio, por la que se aprueban los trazadores y marcadores que deben incorporarse a determinados hidrocarburos para la aplicación de los tipos reducidos establecidos en la Ley 38/1992, de 28 de diciembre, de Impuestos Especiales, modificada por la Orden PRE/3493/2004, de 22 de octubre.			

ANEXO VI: FICHA ESPECIFICACIONES BIODIÉSEL BIOOILS

BioOils Huelva	INFORME DE RESULTADOS LABORATORIO BIO-OILS HUELVA
--------------------------	---

Producto: BODIESEL
Identificación de lote:
Identificación de muestra: S0321112023
Identificación precisos:

Nº de boletín:

Ensayo (unidades)	Resultado	Norma	Valor límite	Analista
Contenido en éster (% m/m)	97,3	EN 14103	>=96,5	CGL
Contenido en poli-insaturados (% m/m)	<0,6	EN 15779	<=1	CGL
Contenido en linoléico (% m/m)	<1,0	EN 14103	<=12	CGL
Índice ácido (mg KOH/g)	0,48	EN 14104	<=0,50	CGL
Punto de inflamación (°C)	>101	EN ISO 2719	>=101	CGL
Densidad a 15°C (Kg/m³)	876,5	EN ISO 12185	860-900	CGL
Viscosidad a 40°C (mm²/s)	4,571	EN ISO 3104	3,50-5,00	CGL
Corrosión a la tira de cobre	1a	EN ISO 2160	Clase 1	CGL
POFF (°C)	9	EN 116	Anotar	CGL
Cenizas sulfatadas (% m/m)	<0,005	EN ISO 3987	<=0,02	CGL
Humedad (mg/Kg)	400	EN ISO 12937	<=500	CGL
Contaminación Total (mg/Kg)(1)	20,3	EN 12662	<=24	CGL
Estabilidad a la oxidación 110°C (h)	>10	EN 15751	>=8	CGL
Índice de Yodo (g de Yodo/100 g)	56,3	EN 16300	<=120	CGL
Contenido en Metanol (% m/m)	0,09	EN 14110	<=0,20	CGL
Contenido en Monoglicéridos (% m/m)	0,28	EN 14105	<=0,30	CGL
Contenido en Diglicéridos (% m/m)	0,12	EN 14105	<=0,20	CGL
Contenido en Triglicéridos (% m/m)	0,05	EN 14105	<=0,20	CGL
Contenido en Glicerol Libre (% m/m)	0,004	EN 14105	<=0,02	CGL
Contenido en Glicerol Total (% m/m)	0,090	EN 14105	<=0,25	CGL
Metales Grupo I (mg/Kg)	<2,0	EN 14538	<=5	CGL
Metales Grupo II (mg/Kg)	<2,0	EN 14538	<=5	CGL
Contenido en fósforo (mg/Kg)	<4,0	EN 16294	<=4	CGL
Contenido en azufre (mg/Kg)	<10	EN ISO 20846	<=10	CGL
Número de cetano	Cumple	PNT-058	>=51	CGL

Observaciones

Aditivos:

No está permitido el uso de aditivos mejorables de POFF, salvo acuerdo con el cliente.
 Se proporcionará información del antioxidante a petición del cliente.

(1) Resultado conforme a la versión de UNE-EN-12662 acordada entre las partes.

Aprobado:
 Eva Mª Herrera
 Responsable de laboratorio

Fecha:
 22/11/2023



Pol. Industrial Nuevo Puerto
 C/. Gobernador Ángel Horcajadas, s/n
 21810 - Palos de la Frontera -- HUELVA
 Tfno: +34 959 369 349