



COMILLAS

UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

ESTUDIO DE VIABILIDAD DE USO DE ACEITE DE GIRASOL EN MOTORES DIESEL Y DISEÑO DE COMPONENTES

Autor: Luis Alonso Vega

Director: Juan Norverto Moriñigo

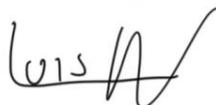
Madrid

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
**Estudio de Viabilidad de uso de Aceite de Girasol en motores Diesel
y Diseño de Componentes**

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el
curso académico 2020/2021 es de mi autoría, original e inédito y
no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos. El Proyecto no es
plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido tomada
de otros documentos está debidamente referenciada.

Fdo.: Luis Alonso Vega

Fecha: 07/ 06/ 2021



Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.: Juan de Norverto

Fecha: 07/06/2021

**NORVERTO
MORIÑIGO
JUAN - DNI
09746499L**

Firmado digitalmente
por NORVERTO
MORIÑIGO JUAN -
DNI 09746499L
Fecha: 2021.06.07
17:56:17 +02'00'



COMILLAS

UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS
INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

ESTUDIO DE VIABILIDAD DE USO DE ACEITE DE
GIRASOL EN MOTORES DIESEL Y DISEÑO DE
COMPONENTES

Autor: Luis Alonso Vega

Director: Juan Norverto Moriñigo

Madrid

ESTUDIO DE VIABILIDAD DE USO DE ACEITE DE GIRASOL EN MOTORES DIESEL Y DISEÑO DE COMPONENTES

Autor: Alonso Vega, Luis.

Director: Norberto Moriñigo, Juan.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

RESUMEN DEL PROYECTO

En este proyecto se ha estudiado el impacto medioambiental que tiene el uso de aceite de girasol en motores Diesel. También se ha determinado la mezcla de Diesel y aceite que se puede emplear en estos motores. Se ha concluido que el uso del aceite reduce las emisiones de gases de efecto invernadero, pero aumenta otras emisiones contaminantes.

Palabras clave: Biodiesel, Aceite de Girasol, Biocombustible, Diesel, Common-Rail

1. Introducción

Actualmente, entre las mayores preocupaciones de cara al futuro están el cambio climático y el agotamiento de los recursos naturales, especialmente el petróleo. Gran parte del cambio climático está provocado por las emisiones provenientes del transporte. Para responder a estos problemas, en los últimos años se están tomando medidas drásticas para reducir el impacto de la actividad humana. Existen normativas que rigen las emisiones que se permite que estas actividades emitan y se vuelven constantemente más restrictivas. También se están haciendo grandes avances en la producción y utilización de biocombustibles. La gasolina y el gasoil se mezclan actualmente con pequeñas cantidades de bioetanol para la gasolina, y de biodiesel para el gasoil, para reducir las emisiones de su utilización y aumentar el tiempo del que dispondremos de la cantidad limitada de petróleo. Si incluso ya vuelan aviones con un combustible que contiene una pequeña proporción de aceite vegetal, ¿cómo es que no usamos el aceite de freír el domingo para ir a trabajar el lunes? ¿Qué habría que hacer para que sea posible? ¿Qué consecuencias tendría?

Lo cierto es que existen empresas que ofrecen kits para modificar vehículos Diesel para su funcionamiento con aceites vegetales. Existen dos tipos de sistemas, los de un tanque y los de dos tanques, uno para Diesel para los arranques y otro con el aceite vegetal que se quiere emplear. Este proyecto se centra en los sistemas de dos tanques, ya que para usar aceite vegetal en motores Diesel Common-Rail modernos es necesario instalar este sistema.

El objetivo fundamental de este proyecto es el análisis de la viabilidad técnica del uso de aceite de girasol mezclado con Diesel como combustible en motores Diesel Common-Rail, en la búsqueda de una fuente de energía más respetuosa con el medio ambiente, especialmente para el transporte. Es necesario determinar las proporciones más adecuadas. Para poder usar esta mezcla como combustible en estos motores se van a diseñar las modificaciones necesarias. Además, no se pretende realizar modificaciones irreversibles a los componentes del motor, únicamente adaptar el sistema de entrega de combustible. También se investiga las consecuencias que la quema de esta mezcla tendrá

en las emisiones del motor, así como en sus prestaciones. Como la legislación varia fuertemente entre países, se estudia además la legalidad de usar aceite como combustible y de las modificaciones necesarias en España.

2. Metodología

Para la realización de este proyecto se van a emplear estudios, datos y publicaciones realizadas por otros investigadores. Una vez se ha extraído la información relevante de ellos, se realizan los cálculos adecuados para este estudio, se representan de la manera más conveniente y se extraen las conclusiones. Los componentes de las modificaciones se han buscado en páginas web de suministros, como RS o Amazon.

3. Resultados

En primer lugar, el uso de aceites vegetales como combustible es legal en España, pero el aceite debe estar gravado con el impuesto a los hidrocarburos. Las modificaciones que necesitan los vehículos para funcionar con este combustible también está permitido realizarlas, pero tienen que estar homologadas.

3.1. Emisiones

Las emisiones de gases de efecto invernadero se dividen en dos etapas, durante la producción del combustible y durante la combustión. En la siguiente tabla se muestran las emisiones durante la producción, la combustión y el total, así como el poder calorífico inferior (PCI) y las emisiones por unidad de energía de las mezclas de Diesel y aceite de girasol tanto crudo como usado.

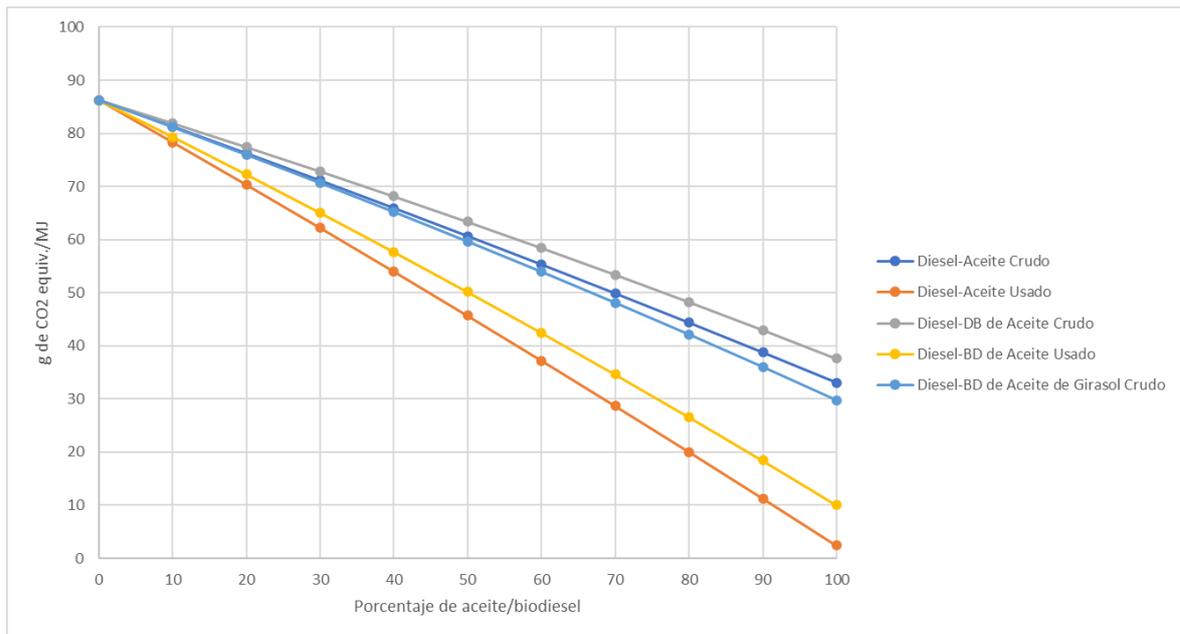
		Emisiones durante las etapas			PCI	Emisiones por unidad de energía
		Producción	Combustión	Total		
		g CO ₂ eq./kg	g CO ₂ eq./kg	g CO ₂ eq./kg	MJ/kg	g CO ₂ eq./MJ
Mezcla Diesel-Aceite de Girasol Crudo (Porcentaje de masa del aceite)	0	357,73	3252,33	3610,06	41,85	86,26
	10	440,96	2936,72	3377,68	41,55	81,29
	20	524,18	2621,11	3145,29	41,25	76,25
	30	607,41	2305,49	2912,90	40,95	71,13
	40	690,64	1989,88	2680,52	40,65	65,93
	50	773,86	1674,27	2448,13	40,36	60,66
	60	857,09	1358,65	2215,75	40,06	55,31
	70	940,32	1043,04	1983,36	39,76	49,89
	80	1023,55	727,43	1750,97	39,46	44,37
	90	1106,77	411,81	1518,59	39,16	38,78
	100	1190,00	96,20	1286,20	38,86	33,10
Mezcla Diesel-Aceite de Girasol Usado (Porcentaje de masa del aceite)	0	357,73	3252,33	3610,06	41,85	86,26
	10	321,96	2936,72	3258,68	41,60	78,34
	20	286,18	2621,11	2907,29	41,34	70,32
	30	250,41	2305,49	2555,90	41,09	62,21
	40	214,64	1989,88	2204,52	40,83	53,99
	50	178,86	1674,27	1853,13	40,58	45,67
	60	143,09	1358,65	1501,75	40,32	37,24
	70	107,32	1043,04	1150,36	40,07	28,71
	80	71,55	727,43	798,97	39,81	20,07
	90	35,77	411,81	447,59	39,56	11,31
	100	0,00	96,20	96,20	39,31	2,45

En la tabla se observa como la energía almacenada en el aceite de girasol tiene menores emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a su ciclo de vida completo en comparación con el Diesel. Por lo que cualquier cantidad de aceite que se le añade al Diesel reduce las emisiones por el uso de esa mezcla respecto a Diesel exclusivamente. Si además el aceite ha sido utilizado anteriormente, los resultados de emisiones se reducen aún más al igual que las emisiones por unidad de energía.

En la siguiente table se muestran los mismos parámetros que en la tabla anterior, pero para las mezclas de Diesel y Biodiesel.

		Emisiones durante las etapas			PCI	Emisiones por unidad de energía
		Producción	Combustión	Total		
		g CO ₂ eq./kg	g CO ₂ eq./kg	g CO ₂ eq./kg	MJ/kg	g CO ₂ eq./MJ
Mezcla Diesel-Biodiesel de Aceite crudo (Porcentaje de masa de Biodiesel)	0	357,73	3252,33	3610,06	41,85	86,26
	10	453,78	2935,68	3389,46	41,40	81,88
	20	549,84	2619,02	3168,86	40,94	77,40
	30	645,89	2302,36	2948,26	40,49	72,82
	50	838,00	1669,05	2507,05	39,58	63,34
	100	1318,28	85,77	1404,05	37,31	37,63
Mezcla Diesel-Biodiesel de Aceite usado (Porcentaje de masa de Biodiesel)	0	357,73	3252,33	3610,06	41,85	86,26
	10	351,28	2935,77	3287,05	41,44	79,33
	20	344,84	2619,20	2964,04	41,02	72,26
	30	338,40	2302,63	2641,03	40,61	65,04
	50	325,51	1669,50	1995,01	39,78	50,16
	100	293,29	86,66	379,95	37,70	10,08
Mezcla Diesel-Biodiesel de Aceite crudo exclusivamente de Girasol (Porcentaje de masa de Biodiesel)	0	357,73	3252,33	3610,06	41,85	86,26
	10	424,52	2935,68	3360,20	41,40	81,17
	20	491,31	2619,02	3110,33	40,94	75,97
	30	558,10	2302,36	2860,46	40,49	70,65
	50	691,68	1669,05	2360,73	39,58	59,64
	100	1025,63	85,77	1111,40	37,31	29,79

Si se comparan estos resultados con las emisiones de las mezclas Diesel-aceite, se observa que el biodiesel tiene unas emisiones superiores para mezclas con la misma proporción de Diesel. Si el biodiesel está producido exclusivamente con aceite de girasol crudo, sus mezclas con Diesel tienen emisiones menores que las mezclas de aceite de girasol crudo y Diesel. Si el aceite de Girasol ha sido utilizado con anterioridad, la quema de la mezcla de este con Diesel emite menos gases de efecto invernadero que si el aceite de transformase en biodiesel antes de ser quemado.



En esta figura se representa la información de las emisiones por unidad de energía de las mezclas. Aquí se aprecia con claridad la gran reducción de emisiones de gases de efecto invernadero que supone el uso de estos biocombustibles, especialmente los basados en aceite usado con anterioridad.

Además de los gases estudiados anteriormente existen otros gases contaminantes para la atmósfera. Al igual que las emisiones de gases de efecto invernadero, las emisiones de óxidos de nitrógeno se reducen al añadir aceite de girasol a la mezcla. No obstante, las emisiones de óxidos de azufre aumentan debido a que, pese a que el aceite contiene una cantidad de azufre muy pequeña, el Diesel moderno pasa un proceso de desulfuración y contiene solo 10 ppm de azufre mientras que el aceite de girasol tiene más de 20 ppm. La combustión de aceite de girasol en un motor Diesel provoca que este emita una cantidad ligeramente mayor de partículas, monóxido de carbono e hidrocarburos.

3.2. Propiedades de la Mezcla Diesel-Aceite de Girasol

Para que se pueda usar un combustible en un motor para el que no fue diseñado es necesario que el combustible tenga unas propiedades similares al combustible original. Las propiedades más relevantes en este caso son la densidad, la viscosidad, la lubricidad, la corrosión, el poder calorífico y el número de cetano. De estas propiedades, el aceite se diferencia del Diesel más en su viscosidad, especialmente a baja temperatura. Por este motivo, la mezcla debe ser calentada por las modificaciones instaladas en el vehículo y la viscosidad será la propiedad más restrictiva para el diseño de las mezclas.

3.3. Determinación de la Mezcla

Usando la viscosidad del Diesel a 10°C como límite para determinar la mezcla Diesel-aceite a emplear se obtienen las siguientes proporciones en masa para temperaturas entre 65°C y 80°C mostradas en la tabla a continuación.

	Diesel-Aceite bruto	Diesel-Aceite usado
Temperatura (°C)	% de Aceite	% de Aceite
65	55	54
70	60	59
75	64	63
80	69	67

En las siguientes tablas se muestran las emisiones de gases de efecto invernadero de las mezclas propuestas según temperatura y tipo de aceite de girasol. Todas las mezclas reducen significativamente las emisiones de estos gases.

Diesel-Aceite bruto					
Temperatura (°C)	% de Aceite	gCO2 eq. /kg	gCO2 eq./MJ	gCO2 eq. /km	Emisiones respecto Diesel (%)
65	55	2331,94	58,00	109,44	67,14
70	60	2215,75	55,31	104,38	64,04
75	64	2122,79	53,15	100,30	61,53
80	69	2006,60	50,43	95,17	58,38

Diesel-Aceite usado					
Temperatura (°C)	% de Aceite	gCO2 eq. /kg	gCO2 eq./MJ	gCO2 eq. /km	Emisiones respecto Diesel (%)
65	54	1712,58	42,31	79,84	48,98
70	59	1536,88	38,09	71,88	44,10
75	63	1396,33	34,69	65,47	40,16
80	67	1255,78	31,28	59,03	36,21

Debido a que los combustibles tienen un poder calorífico distinto, el consumo de combustible cambia. Teniendo en cuenta el coste de los componentes de las mezclas, se obtienen los costes por kilómetro que se exponen en la siguiente tabla. El coste al usar Diesel es de 0,0697 €/km.

Temperatura (°C)	Aceite bruto		Aceite usado	
	kg/km	€/km	kg/km	€/km
65	0,04693	0,06512	0,04662	0,06113
70	0,04711	0,06469	0,04677	0,06031
75	0,04725	0,06434	0,04689	0,05966
80	0,04743	0,06390	0,04700	0,05899

4. Conclusiones

En este proyecto se ha llegado a la conclusión de que el uso de aceite de girasol en motores Diesel no solo es posible, sino también produce menos gases de efecto invernadero y reduce las emisiones de óxidos de nitrógeno. No obstante, las emisiones de otros contaminantes, como las partículas, los óxidos de azufre y los hidrocarburos aumentan. Las modificaciones no son económicamente viables, ya que el ahorro en el coste de combustible es demasiado reducido para justificar la inversión en las modificaciones. En las circunstancias actuales, los recursos de aceites destinados a su uso como carburantes es más lógico emplearlos para la fabricación de Biodiesel que para su uso directamente como aceite, dado que el uso de Biodiesel no requiere de las modificaciones para el uso de aceite.

5. Referencias

Bashir, O., F. Khalili, B. Sweileh, “Combustion and Emission Characteristics of Straight Vegetable Oil and Diesel Fuel Blends”, Jordan Journal of Chemistry Vol. 9 No.2, 2014, páginas 134-147, Jordan 2014.

https://www.researchgate.net/publication/312264033_Combustion_and_Emission_Characteristics_of_Straight_Vegetable_Oils_and_Diesel_Fuel_Blends

Blin, J., C. Brunshwig, A. Chapuis, O. Changotade, S. Sidibe, E. Noumi, P. Girard “CHARACTERISTICS OF VEGETABLE OILS FOR USE AS FUEL IN STATIONARY DIESEL ENGINES - TOWARDS SPECIFICATIONS FOR A STANDARD IN WEST AFRICA”, RenewableandSustainableEnergyReviews, 2013, 22, páginas 580-597.

https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00814899/file/CHARACTERISTICS_OF_VEGETABLE_OILS_FOR_USE_AS_FUEL_IN_STATIONARY_DIESEL_ENGINES_-_TOWARDS_SPECIFICATIONS_FOR_A_STANDARD_IN_WEST_AFRICA.pdf

Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT), “Análisis de Ciclo de Vida de Combustibles alternativos para el Transporte”, Fase II. Análisis de Ciclo de Vida Comparativo del Biodiésel y del Diésel, 2006.

Corsini, A., R. di Antonio, G. di Nucci, A. Marchegiani, F. Rispoli, P. Venturini, "Performance Analysis of a Common-rail Diesel Engine Fuelled with Different Blends of Waste Cooking oil and Gasoil", Energy Procedia, 101, páginas 606-613, 2016.

https://www.researchgate.net/publication/311978353_Performance_Analysis_of_a_Common-rail_Diesel_Engine_Fuelled_with_Different_Blends_of_Waste_Cooking_oil_and_Gasoil

Eryilmaz, T., M. Yesilyurt, “Comparative analysis of fuel properties of Biodiesels derived from sunflower oil, waste sunflower oil and neutralized waste sunflower oil”, Fresenius Environmental Bulletin, volumen 24. Páginas 3197-3204, 2015

https://www.researchgate.net/publication/292551615_Comparative_analysis_of_fuel_properties_of_Biodiesels_derived_from_sunflower_oil_waste_sunflower_oil_and_neutralized_waste_sunflower_oil

Esteban, B., J. Riba, G. Baquero, A. Rius, R. Puig, “Temperature dependence of density and viscosity of vegetable oils”, Biomass and Bioenergy 42, páginas 164-171, Igualada 2012. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.03.007>

Mohammadshirazi, A., A. Akram, S. Rafiee, E. Kalhor, “Energy and cost analyses of biodiesel production from waste cooking oil”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 33, páginas 44–49, 2014.

https://www.researchgate.net/publication/260296131_Energy_and_cost_analyses_of_biodiesel_production_from_waste_cooking_oil

Payri, F., J. M. Desantes, “Motores de combustión interna alternativos”, Barcelona 2011.

Requena, J.F., A. Guimaraes, S. Quirós, E. Relea, S. Hernandez-Navarro, L.M. Navas Gracia, J. Martin-Gil, H. Fresneda Cuesta, “Life Cycle Assessment (LCA) of the Biofuel Production Process from Sunflower Oil, Rapeseed Oil and Soybean Oil”, Fuel Processing Technology, 92, páginas 190-199, 2010.

https://www.researchgate.net/publication/256497478_Life_Cycle_Assessment_LCA_of_the_Biofuel_Production_Process_from_Sunflower_Oil_Rapeseed_Oil_and_Soybean_Oil

FEASIBILITY STUDY OF THE USE OF SUNFLOWER OIL IN DIESEL ENGINES AND DESIGN OF COMPONENTS

Author: Alonso Vega, Luis.

Supervisor: Norverto Moriñigo, Juan.

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

ABSTRACT

The environmental impact of the use of sunflower oil in diesel engines has been studied in this project. The mixture of Diesel and oil that can be used in these engines has also been determined. It has been concluded that the use of oil reduces greenhouse gas emissions but increases other polluting emissions.

Keywords: Biodiesel, Sunflower Oil, Biofuel, Diesel, Common-Rail

1. Introduction

Currently, among the biggest concerns for the future are climate change and the depletion of natural resources, especially oil. Much of climate change is caused by emissions from transportation. To respond to these problems, drastic measures have been taken in recent years to reduce the impact of human activity. There are regulations governing the emissions that these activities are allowed to emit, and they are constantly becoming more restrictive. Great strides are also being made in the production and use of biofuels. Gasoline and diesel are currently mixed with small amounts of bioethanol for gasoline, and biodiesel for diesel, to reduce emissions from their use and increase the time that we will have the limited amount of oil. If even airplanes already fly with a fuel that contains a small proportion of vegetable oil, why is it that we do not use frying oil from Sunday to go to work on Monday? What should be done to make it possible? What consequences would it have?

The truth is that there are companies that offer kits to modify Diesel vehicles for operation with vegetable oils. There are two types of systems, those with a tank and those with two tanks, one for Diesel for start-ups and the other with the vegetable oil to be used. This project focuses on two-tank systems, as it is necessary to install this system to use vegetable oil in modern Common-Rail Diesel engines.

The fundamental objective of this project is the analysis of the technical feasibility of using sunflower oil mixed with Diesel as fuel in Common-Rail Diesel engines, in the search for a more environmentally friendly energy source, especially for transport. . It is necessary to determine the most suitable proportions. To use this mixture as fuel in these engines, the necessary modifications will be designed. Furthermore, it is not intended to make irreversible modifications to the engine components, only to adapt the fuel delivery system. The consequences that the burning of this mixture will have on the engine's emissions, as well as its performance, are also being investigated. As the legislation varies greatly between countries, the legality of using oil as fuel and the necessary modifications in Spain are also studied.

2. Methodology

To carry out this project, studies, data, and publications made by other researchers will be used. Once the relevant information has been extracted from them, the appropriate calculations for this study are made, they are represented in the most convenient way and conclusions are drawn. The components for the modifications have been searched on supply websites such as RS or Amazon.

3. Results

In the first place, the use of vegetable oils as fuel is legal in Spain, but the oil must be subject to the hydrocarbon tax. The modifications that the vehicles needs to run on this fuel are can also be carried out, but they must be homologated.

3.1. Emissions

Greenhouse gas emissions are divided into two stages, during fuel production and during combustion. The following table shows the emissions during production, combustion, and the total, as well as the lower calorific value (LCV) and the emissions per unit of energy of the mixtures of Diesel and sunflower oil both crude and used.

		Emissions during stages			LCV	Emissions per unit of energy
		Production	Combustion	Total		
		g CO ₂ eq./kg	g CO ₂ eq./kg	g CO ₂ eq./kg	MJ/kg	g CO ₂ eq./MJ
Mixture Diesel-Crude Sunflower Oil (oil mass percentage)	0	357,73	3252,33	3610,06	41,85	86,26
	10	440,96	2936,72	3377,68	41,55	81,29
	20	524,18	2621,11	3145,29	41,25	76,25
	30	607,41	2305,49	2912,90	40,95	71,13
	40	690,64	1989,88	2680,52	40,65	65,93
	50	773,86	1674,27	2448,13	40,36	60,66
	60	857,09	1358,65	2215,75	40,06	55,31
	70	940,32	1043,04	1983,36	39,76	49,89
	80	1023,55	727,43	1750,97	39,46	44,37
	90	1106,77	411,81	1518,59	39,16	38,78
	100	1190,00	96,20	1286,20	38,86	33,10
Mixture Diesel-Used Sunflower Oil (oil mass percentage)	0	357,73	3252,33	3610,06	41,85	86,26
	10	321,96	2936,72	3258,68	41,60	78,34
	20	286,18	2621,11	2907,29	41,34	70,32
	30	250,41	2305,49	2555,90	41,09	62,21
	40	214,64	1989,88	2204,52	40,83	53,99
	50	178,86	1674,27	1853,13	40,58	45,67
	60	143,09	1358,65	1501,75	40,32	37,24
	70	107,32	1043,04	1150,36	40,07	28,71
	80	71,55	727,43	798,97	39,81	20,07
	90	35,77	411,81	447,59	39,56	11,31
	100	0,00	96,20	96,20	39,31	2,45

The table shows how the energy stored in sunflower oil has lower greenhouse gas emissions associated with its complete life cycle compared to Diesel. Therefore, any amount of oil that is added to Diesel reduces emissions from the use of that mixture with respect to Diesel exclusively. If the oil has also been used before, the emissions results are further reduced as are the emissions per unit of energy.

The following table shows the same parameters as in the previous table, but for Diesel and Biodiesel blends.

		Emissions during stages			LCV	Emissions per unit of energy
		Production	Combustion	Total		
		g CO ₂ eq./kg	g CO ₂ eq./kg	g CO ₂ eq./kg	MJ/kg	g CO ₂ eq./MJ
Mixture Diesel - Crude Oil Biodiesel (BD mass percentage)	0	357,73	3252,33	3610,06	41,85	86,26
	10	453,78	2935,68	3389,46	41,40	81,88
	20	549,84	2619,02	3168,86	40,94	77,40
	30	645,89	2302,36	2948,26	40,49	72,82
	50	838,00	1669,05	2507,05	39,58	63,34
	100	1318,28	85,77	1404,05	37,31	37,63
Mixture Diesel - Used Oil Biodiesel (BD mass percentage)	0	357,73	3252,33	3610,06	41,85	86,26
	10	351,28	2935,77	3287,05	41,44	79,33
	20	344,84	2619,20	2964,04	41,02	72,26
	30	338,40	2302,63	2641,03	40,61	65,04
	50	325,51	1669,50	1995,01	39,78	50,16
	100	293,29	86,66	379,95	37,70	10,08
Mixture Diesel - Crude Sunflower Oil Biodiesel (BD mass percentage)	0	357,73	3252,33	3610,06	41,85	86,26
	10	424,52	2935,68	3360,20	41,40	81,17
	20	491,31	2619,02	3110,33	40,94	75,97
	30	558,10	2302,36	2860,46	40,49	70,65
	50	691,68	1669,05	2360,73	39,58	59,64
	100	1025,63	85,77	1111,40	37,31	29,79

If these results are compared with the emissions of Diesel-oil mixtures, it is observed that biodiesel has higher emissions for mixtures with the same proportion of Diesel. If biodiesel is produced exclusively with crude sunflower oil, its blends with Diesel have lower emissions than blends of crude sunflower oil and Diesel. If sunflower oil has been used before, burning the mixture of this with diesel emits less greenhouse gases than if the oil were transformed into biodiesel before being burned.

In addition to the gases studied above, there are other polluting gases for the atmosphere. Like greenhouse gas emissions, nitrogen oxide emissions are reduced by adding sunflower oil to the mix. However, emissions of sulphur oxides increase because, despite the very small amount of sulphur contained in the oil, modern Diesel fuel undergoes a desulfurization process and contains only 10 ppm of sulphur while sunflower oil has more than 20 ppm. The combustion of sunflower oil in a diesel engine causes it to emit slightly more particles, carbon monoxide and hydrocarbons.

3.2. Properties of the Diesel-Sunflower Oil Blend

For a fuel to be used in an engine for which it was not designed, the fuel must have similar properties to the original fuel. The most relevant properties in this case are density, viscosity, lubricity, corrosion, calorific value and cetane number. Of these properties, oil differs from Diesel fuel more in its viscosity, especially at low temperatures. For this reason, the mixture must be heated by the modifications installed in the vehicle and the viscosity will be the most restrictive property for the design of the mixtures.

3.3. Determination of the Mixture

Using the viscosity of Diesel at 10°C as the limit to determine the Diesel-oil mixture to be used, the following mass proportions are obtained for temperatures between 65°C and 80°C shown in the table below.

	Diesel-Crude Sunflower Oil	Diesel-Used Sunflower Oil
Temperature (°C)	% of Oil	% of Oil
65	55	54
70	60	59
75	64	63
80	69	67

The following tables show the greenhouse gas emissions of the proposed mixtures according to temperature and type of sunflower oil. All mixtures significantly reduce the emissions of these gases.

Diesel-Crude Sunflower Oil					
Temperature (°C)	% of Oil	gCO2 eq. /kg	gCO2 eq. /MJ	gCO2 eq. /km	Emissions compared to Diesel (%)
65	55	2331,94	58,00	109,44	67,14
70	60	2215,75	55,31	104,38	64,04
75	64	2122,79	53,15	100,30	61,53
80	69	2006,60	50,43	95,17	58,38

Diesel-Used Sunflower Oil					
Temperature (°C)	% of Oil	gCO2 eq. /kg	gCO2 eq. /MJ	gCO2 eq. /km	Emissions compared to Diesel (%)
65	54	1712,58	42,31	79,84	48,98
70	59	1536,88	38,09	71,88	44,10
75	63	1396,33	34,69	65,47	40,16
80	67	1255,78	31,28	59,03	36,21

Because fuels have a different calorific value, fuel consumption changes. Considering the cost of the components of the mixtures, the costs per kilometre are obtained, which are shown in the following table. The cost when using Diesel is 0.0697 €/ km.

Temperature (°C)	Crude Sunflower Oil		Used Sunflower Oil	
	kg/km	€/km	kg/km	€/km
65	0,04693	0,06512	0,04662	0,06113
70	0,04711	0,06469	0,04677	0,06031
75	0,04725	0,06434	0,04689	0,05966
80	0,04743	0,06390	0,04700	0,05899

4. Conclusions

In this project, it has been concluded that the use of sunflower oil in diesel engines is not only possible, but also produces less greenhouse gases and reduces nitrogen oxide emissions. However, emissions of other pollutants, such as particulates, sulfur oxides, and hydrocarbons are increased. The modifications are not economically feasible, as the fuel cost savings are too small to justify the investment in the modifications. In the current circumstances, the oil resources destined for use as fuels is more logical to use them for the manufacture of Biodiesel than for their use directly as oil, since the use of Biodiesel does not require modifications for the use of oil.

5. References

Bashir, O., F. Khalili, B. Sweileh, “Combustion and Emission Characteristics of Straight Vegetable Oil and Diesel Fuel Blends”, Jordan Journal of Chemistry Vol. 9 No.2, 2014, páginas 134-147, Jordan 2014.

https://www.researchgate.net/publication/312264033_Combustion_and_Emission_Characteristics_of_Straight_Vegetable_Oils_and_Diesel_Fuel_Blends

Blin, J., C. Brunshwig, A. Chapuis, O. Changotade, S. Sidibe, E. Noumi, P. Girard “CHARACTERISTICS OF VEGETABLE OILS FOR USE AS FUEL IN STATIONARY DIESEL ENGINES - TOWARDS SPECIFICATIONS FOR A STANDARD IN WEST AFRICA”, RenewableandSustainableEnergyReviews, 2013, 22, páginas 580-597.

https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00814899/file/CHARACTERISTICS_OF_VEGETABLE_OILS_FOR_USE_AS_FUEL_IN_STATIONARY_DIESEL_ENGINES_-_TOWARDS_SPECIFICATIONS_FOR_A_STANDARD_IN_WEST_AFRICA.pdf

Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT),
“Análisis de Ciclo de Vida de Combustibles alternativos para el Transporte”, Fase II.
Análisis de Ciclo de Vida Comparativo del Biodiésel y del Diésel, 2006.

Corsini, A., R. di Antonio, G. di Nucci, A. Marchegiani, F. Rispoli, P. Venturini,
"Performance Analysis of a Common-rail Diesel Engine Fuelled with Different Blends of
Waste Cooking oil and Gasoil", Energy Procedia, 101, páginas 606-613, 2016.

[https://www.researchgate.net/publication/311978353_Performance_Analysis_of_a_Comm
on-
rail_Diesel_Engine_Fuelled_with_Different_Blends_of_Waste_Cooking_oil_and_Gasoil](https://www.researchgate.net/publication/311978353_Performance_Analysis_of_a_Common-rail_Diesel_Engine_Fuelled_with_Different_Blends_of_Waste_Cooking_oil_and_Gasoil)

Eryilmaz, T., M. Yesilyurt, “Comparative analysis of fuel properties of Biodiesels derived
from sunflower oil, waste sunflower oil and neutralized waste sunflower oil”, Fresenius
Environmental Bulletin, volumen 24. Páginas 3197-3204, 2015

[https://www.researchgate.net/publication/292551615_Comparative_analysis_of_fuel_prop
erties_of_Biodiesels_derived_from_sunflower_oil_waste_sunflower_oil_and_neutralized
waste_sunflower_oil](https://www.researchgate.net/publication/292551615_Comparative_analysis_of_fuel_properties_of_Biodiesels_derived_from_sunflower_oil_waste_sunflower_oil_and_neutralized_waste_sunflower_oil)

Esteban, B., J. Riba, G. Baquero, A. Rius, R. Puig, “Temperature dependence of density
and viscosity of vegetable oils”, Biomass and Bioenergy 42, páginas 164-171, Igualada
2012. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.03.007>

Mohammadshirazi, A., A. Akram, S. Rafiee, E. Kalhor, “Energy and cost analyses of
biodiesel production from waste cooking oil”, Renewable and Sustainable Energy
Reviews, 33, páginas 44–49, 2014.

[https://www.researchgate.net/publication/260296131_Energy_and_cost_analyses_of_biodi
esel_production_from_waste_cooking_oil](https://www.researchgate.net/publication/260296131_Energy_and_cost_analyses_of_biodiesel_production_from_waste_cooking_oil)

Payri, F., J. M. Desantes, “Motores de combustión interna alternativos”, Barcelona 2011.

Requena, J.F., A. Guimaraes, S. Quirós, E. Relea, S. Hernandez-Navarro, L.M. Navas
Gracia, J. Martin-Gil, H. Fresneda Cuesta, “Life Cycle Assessment (LCA) of the Biofuel
Production Process from Sunflower Oil, Rapeseed Oil and Soybean Oil”, Fuel Processing
Technology, 92, páginas 190-199, 2010.

[https://www.researchgate.net/publication/256497478_Life_Cycle_Assessment_LCA_of_th
e_Biofuel_Production_Process_from_Sunflower_Oil_Rapeseed_Oil_and_Soybean_Oil](https://www.researchgate.net/publication/256497478_Life_Cycle_Assessment_LCA_of_the_Biofuel_Production_Process_from_Sunflower_Oil_Rapeseed_Oil_and_Soybean_Oil)

Agradecimientos

En primer lugar, me gustaría agradecer a mi director, Juan Norverto Moriño, por haber aceptado realizar este proyecto que le propuse conmigo y por su disponibilidad y sus consejos a lo largo del transcurso del proyecto.

Seguidamente querría agradecer a mi coordinadora, Eva María Arenas, por su dedicación a nuestros proyectos y estar pendiente de nosotros.

También me gustaría agradecer a mi familia y amigos por su apoyo, durante el proyecto y siempre.

Por último, querría agradecer especialmente a Inés, por haber estado cada día conmigo y hacerme la persona más feliz de la Tierra.

Muchas gracias a todos.

Índice de la memoria

Capítulo 1. Introducción	7
Capítulo 2. Descripción de las Tecnologías.....	8
Capítulo 3. Estado de la Cuestión	9
Capítulo 4. Definición del Trabajo	11
Justificación	11
Objetivos.....	11
Metodología.....	12
Capítulo 5. Desarrollo del Proyecto	13
Legislación.....	13
<i>Uso de Aceite Vegetal como Combustible.....</i>	<i>13</i>
<i>Modificaciones del Sistema de Combustible</i>	<i>15</i>
Ciclo de vida del aceite vegetal	17
<i>Aceite vegetal como combustible.....</i>	<i>17</i>
<i>Biodiesel de aceite vegetal</i>	<i>19</i>
Emisiones durante la combustión	23
<i>Emisiones de efecto invernadero del Diesel.....</i>	<i>23</i>
<i>Emisiones de efecto invernadero del Aceite de Girasol</i>	<i>24</i>
<i>Emisiones de efecto invernadero del Biodiesel</i>	<i>26</i>
Emisiones de Mezclas de Diesel-Aceite de Girasol y Diesel-Biodiesel	27
Emisiones contaminantes.....	31
<i>Óxidos de Nitrógeno.....</i>	<i>31</i>
<i>Óxidos de Azufre.....</i>	<i>33</i>
<i>Otras Emisiones Contaminantes</i>	<i>34</i>
Precio de los Combustibles.....	35
<i>Precio del Diesel</i>	<i>35</i>
<i>Precio del aceite bruto</i>	<i>35</i>
<i>Precio del aceite usado</i>	<i>36</i>
<i>Precio del Biodiesel.....</i>	<i>36</i>

Pretratamiento para Aceite Vegetal Usado	37
Diseño de las Modificaciones	39
<i>Circuito de Combustible</i>	39
<i>Circuito de Control Eléctrico</i>	42
Propiedades de mezcla Aceite-Diesel.....	49
<i>Densidad</i>	49
<i>Viscosidad</i>	51
<i>Lubricidad</i>	53
<i>Corrosión</i>	53
<i>PCI</i>	54
<i>Dosado Estequiométrico</i>	54
<i>Número de Cetano</i>	55
Determinación de la Mezcla Diesel-Aceite	57
<i>Emisiones</i>	75
<i>Consumo y Costes</i>	76
Capítulo 6. Análisis de Resultados	80
Capítulo 7. Conclusiones y Trabajos Futuros	83
Capítulo 8. Bibliografía	85
ANEXO I	88

Índice de figuras

Figura 1: Emisiones por unidad de energía frente a porcentaje de combustible alternativo de la mezcla. Fuente: elaboración propia.	30
Figura 2: Emisiones de óxidos de nitrógeno frente al porcentaje de aceite. Fuente: elaboración propia.	32
Figura 3: Modificaciones al sistema de alimentación de combustible. Fuente: elaboración propia.	39
Figura 4: Control de la válvula de alimentación. Fuente: elaboración propia.	42
Figura 5:: Control de la válvula de retorno. Fuente: elaboración propia.	44
Figura 6: Control de la bomba de agua. Fuente: elaboración propia.	45
Figura 7: Circuitos eléctricos con marcas. Fuente: elaboración propia.	46
Figura 8: Variación de la densidad de los componentes frente a la temperatura. Fuente: elaboración propia.	51
Figura 9: Variación de la viscosidad cinemática de los componentes frente a la temperatura. Fuente: elaboración propia.	53
Figura 10: Viscosidad de la mezcla Diesel-aceite de girasol bruto para distintas temperaturas. Fuente: elaboración propia.	70
Figura 11: Viscosidad de la mezcla Diesel-aceite de girasol usado para distintas temperaturas. Fuente: elaboración propia.	70
Figura 12: Porcentajes de aceite recomendados en relación con la temperatura. Fuente: elaboración propia.	73
Figura 13: Porcentajes de aceite recomendados en relación con la temperatura. Fuente: elaboración propia.	74

Índice de tablas

Tabla 1: Potencial de calentamiento global de diferentes gases emitidos. Fuente: [6]	8
Tabla 2: Emisiones durante la producción de combustibles. Fuente: [6]	18
Tabla 3: Datos de diferentes mezclas de Biodiesel y Diesel. Fuente: [6]	20
Tabla 4: Emisiones de CO ₂ eq. durante la producción de diferentes mezclas de Biodiesel y Diesel. Fuente: elaboración propia	21
Tabla 5: Emisiones de CO ₂ eq. durante la producción de diferentes mezclas de Biodiesel de aceite de girasol y Diesel. Fuente: elaboración propia.	22
Tabla 6: Emisiones durante la combustión de Diesel. Fuente: elaboración propia.	24
Tabla 7: Emisiones durante la combustión de aceite de girasol. Fuente: elaboración propia.	25
Tabla 8: Emisiones durante la combustión de Biodiesel. Fuente: elaboración propia.	26
Tabla 9: Poder calorífico de los componentes de las mezclas. Fuente: elaboración propia.	27
Tabla 10: Emisiones totales de las mezclas de aceite de girasol y Diesel. Fuente: elaboración propia.	28
Tabla 11: Emisiones totales de mezclas de Biodiesel y Diesel. Fuente: elaboración propia.	29
Tabla 12: Contenido en azufre de los combustibles. Fuente: elaboración propia.	33
Tabla 13: Consumo y costes del uso de Biodiesel. Fuente: elaboración propia.	36
Tabla 14: Elementos del sistema de combustible. Fuente: elaboración propia.	41
Tabla 15: Elementos de los circuitos de control. Fuente: elaboración propia.	47
Tabla 16: Densidad de los combustibles a estudiar con relación a la temperatura. Fuente: elaboración propia.	50
Tabla 17: Viscosidad de los combustibles a estudiar con relación a la temperatura. Fuente: elaboración propia.	52
Tabla 18: Fórmula química y AFR del Diesel y aceites. Fuente: elaboración propia.	55
Tabla 19: Números de cetano de los combustibles. Fuente: elaboración propia.	56

Tabla 20:Parametros del Diesel a 10°C. Fuente: elaboración propia.....	57
Tabla 21: Masas molares del Diesel y los aceites de girasol. Fuente: elaboración propia..	59
Tabla 22: Densidad del Diesel y los aceites calentados. Fuente: elaboración propia.	60
Tabla 23: Viscosidad cinemática del Diesel y los aceites calentados. Fuente: elaboración propia.....	60
Tabla 24:Viscosidad dinámica del Diesel y los aceites calentados. Fuente: elaboración propia.....	60
Tabla 25:Mezcla Diesel-Aceite de Girasol Crudo a 65°C. Fuente: elaboración propia.....	62
Tabla 26:Mezcla Diesel-Aceite de Girasol Crudo a 70°C. Fuente: elaboración propia.....	63
Tabla 27:Mezcla Diesel-Aceite de Girasol Crudo a 75°C. Fuente: elaboración propia.....	64
Tabla 28:Mezcla Diesel-Aceite de Girasol Crudo a 80°C. Fuente: elaboración propia.....	65
Tabla 29:Mezcla Diesel-Aceite de Girasol Usado a 65°C. Fuente: elaboración propia.....	66
Tabla 30:Mezcla Diesel-Aceite de Girasol Usado a 70°C. Fuente: elaboración propia.....	67
Tabla 31:Mezcla Diesel-Aceite de Girasol Usado a 75°C. Fuente: elaboración propia.....	68
Tabla 32:Mezcla Diesel-Aceite de Girasol Usado a 80°C. Fuente: elaboración propia.....	69
Tabla 33:Máximos porcentajes de masa de aceite en función de la temperatura. Fuente: elaboración propia.	71
Tabla 34:Composición de ácidos grasos de los aceites de girasol bruto y usado. Fuente: elaboración propia.	72
Tabla 35: Emisiones de las mezclas Diesel-Aceite bruto. Fuente: elaboración propia.....	75
Tabla 36: Emisiones de las mezclas Diesel-Aceite usado. Fuente: elaboración propia.....	75
Tabla 37: PCI y consumo de las mezclas de aceite bruto. Fuente: elaboración propia.....	76
Tabla 38: PCI y consumo de las mezclas de aceite usado. Fuente: elaboración propia.....	76
Tabla 39: Consumo y coste de uso de las mezclas. Fuente: elaboración propia.	77
Tabla 40:Consumos en l/100km del coche del estudio. Fuente: elaboración propia.	78
Tabla 41: Litros de combustible hasta el retorno de la inversión. Fuente: elaboración propia.	79
Tabla 42: Emisiones de los combustibles y mezclas. Fuente: elaboración propia.....	80
Tabla 43:Emisiones de efecto invernadero de los combustibles. Fuente: elaboración propia.	83

Tabla 44: Productos sugeridos para el pretratamiento de aceite usado. Fuente: elaboración propia.	88
Tabla 45: Productos sugeridos para el circuito de combustible. Fuente: elaboración propia.	91
Tabla 46: Productos sugeridos para el circuito de control. Fuente: elaboración propia.	92

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, entre las mayores preocupaciones de cara al futuro están el cambio climático y el agotamiento de los recursos naturales, especialmente el petróleo. Gran parte del cambio climático está provocado por las emisiones provenientes del transporte. Para responder a estos problemas, en los últimos años se están tomando medidas drásticas para reducir el impacto de la actividad humana. Existen normativas que rigen las emisiones que se permite que estas actividades emitan y se vuelven constantemente más restrictivas. Además, se presentan cada vez más vehículos híbridos, híbridos enchufables o eléctricos y se descatalogan modelos puramente de combustión. Incluso se pretende que la venta de vehículos con motores de combustión esté completamente prohibida en el futuro. Sin embargo, aunque se prohíba su venta, seguirán existiendo vehículos con motores de combustión que no habrán llegado aún al final de su vida útil.

También se están haciendo grandes avances en la producción y utilización de biocombustibles. La gasolina y el gasoil se mezclan actualmente con pequeñas cantidades de bioetanol para la gasolina, y de biodiesel para el gasoil, para reducir las emisiones de su utilización y aumentar el tiempo del que dispondremos de la cantidad limitada de petróleo. Si incluso ya vuelan aviones con un combustible que contiene una pequeña proporción de aceite vegetal, ¿cómo es que no usamos el aceite de freír el domingo para ir a trabajar el lunes? ¿Qué habría que hacer para que sea posible? ¿Qué consecuencias tendría?

Capítulo 2. DESCRIPCIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS

Durante este estudio se utilizarán los gramos de CO₂ equivalentes, que expresan las emisiones de gases contaminantes en los gramos de CO₂ que habría que emitir para tener el mismo efecto sobre el planeta. Los principales gases que contribuyen al calentamiento global son, además del CO₂, el metano (CH₄) y el óxido nitroso (N₂O). En la tabla 1 se muestran los potenciales de calentamiento de los principales gases de efecto invernadero.

	CO ₂	N ₂ O	CH ₄
Potencial de calentamiento	1	310	21

Tabla 1: Potencial de calentamiento global de diferentes gases emitidos. Fuente: [6]

Estos potenciales caracterizan la capacidad de provocar calentamiento global que tiene cada uno de los gases referido a la capacidad que tienen las emisiones de CO₂. De esta manera, por ejemplo, la emisión de 1 gramo de N₂O es equivalente a la emisión de 21 gramos de CO₂.

Capítulo 3. ESTADO DE LA CUESTIÓN

La idea de utilizar aceite vegetal como combustible en motores de encendido por compresión no es nueva y está relativamente extendida en algunos países de Europa y América.

ATG (Alternative Technology Group GmbH), una empresa alemana, ofrece kits que modifican el sistema de combustible de automóviles, camiones, tractores, etc para que puedan funcionar exclusivamente con aceite vegetal. Sin embargo, la instalación de estos sistemas se recomienda para algunos sistemas de inyección más convencionales como las bombas en línea o rotativas. Además, este fabricante sugiere que los sistemas de inyección sean de algunas marcas concretas, de las que se sabe que sus componentes son más resistentes, como Bosch o Denso entre otros. También especifica que la instalación en motores que no usen estos sistemas es más delicada y debe ser realizada por un especialista, debido a los componentes y regulación más complejos que conlleva.

Estos kits se dividen en 2 categorías, 1 tanque y 2 tanques. Los kits de un tanque son exclusivamente para motores relativamente antiguos, que poseen una bomba de inyección y unos inyectores capaces de funcionar con aceite vegetal puro en cualquier condición, incluido el arranque. Son siempre motores de bajas prestaciones de inyección mecánica, como los primeros 1.9 TDi de Volkswagen. Es común que en el kit esté incluido un calentador de combustible. Existen kits de un tanque más sofisticados que además incluyen nuevas puntas para los inyectores, una reprogramación del ordenador de control del motor, si el motor dispone de uno, y un filtro de combustible calentado.

Los kits de 2 tanques permiten usar Diesel o aceite, pero no los dos simultáneamente. Estos kits son más costosos que los de un tanque, pero permiten realizar los arranques con Diesel. Esto es recomendable en muchos motores de inyección mecánica e imprescindible en los de inyección Common-Rail. Además, los de 2 tanques requieren unas válvulas y su control electrónico para cambiar de un combustible a otro y un intercambiador de calor o un calentador para aumentar la temperatura del aceite y así reducir su viscosidad.

Todos estos kits se basan en la utilización de aceite al 100% pero si está instalado el sistema de un depósito, para los meses de invierno se recomienda en climas fríos mezclar el aceite con Diesel. En el caso de tener instalado un sistema de dos tanques, no es necesario, desde un punto de vista técnico, mezclar los combustibles ya que el aceite solo se usará con el motor a temperatura nominal y con el combustible precalentado.

El precio de estos sistemas varía fuertemente. Los kits de un tanque empiezan en un coste nulo, para aquellos motores que no requieren modificación alguna para funcionar con aceite vegetal y sus propietarios utilizan todos los elementos originales del motor sin modificaciones y llegan hasta los 850€ para kits que incluyen nuevos inyectores, intercambiador de calor para calentar el combustible y una reprogramación del ordenador de control del motor. Los kits de 2 tanques son generalmente más costosos, al incluir un tanque adicional y un conjunto de válvulas para poder hacer el cambio del tanque del que proviene el combustible. Para un kit de estas características se suelen pagar unos 1500€.

Capítulo 4. DEFINICIÓN DEL TRABAJO

JUSTIFICACIÓN

Pese a que existen empresas que fabrican estos kits, no se dispone de la mezcla que es más conveniente utilizar ni de los efectos que las diferentes mezclas provocan. Además, el principal motivo por el que se instalan estos kits es el ahorro económico en el coste del combustible, pero no está justificado cuantos kilómetros es necesario recorrer para que haya beneficio económico. Para los kits ya existentes existe la opción de que el montaje lo realice el propietario, sin embargo, se recomienda que lo realice un taller certificado por la empresa que fabrica el kit. Con la idea de aumentar el beneficio económico, es interesante la opción de diseñar las modificaciones, comprar los componentes e instalarlos uno mismo. Sin duda, una cuestión muy importante de este proyecto es la legalidad de usar aceite de girasol como combustible, ya que es una práctica posible en algunos países europeos no significa que sea legal en España.

En vez de realizar este estudio para una variedad de aceites, el proyecto se va a centrar en el uso del aceite de girasol, ya que es de los más empleados en España, especialmente en alimentación y tiene un precio moderado. Al centrarse en un aceite exclusivamente se puede alcanzar más precisión y detalle en el estudio y las conclusiones.

OBJETIVOS

El objetivo fundamental de este proyecto es el análisis de la viabilidad técnica del uso de aceite de girasol mezclado con Diesel como combustible en motores Diesel Common-Rail, en la búsqueda de una fuente de energía más respetuosa con el medio ambiente, especialmente para el transporte. Es necesario determinar las proporciones más adecuadas. Para poder usar esta mezcla como combustible en estos motores se van a diseñar las

modificaciones necesarias. Además, no se pretende realizar modificaciones irreversibles a los componentes del motor, únicamente adaptar el sistema de entrega de combustible.

También se investiga las consecuencias que la quema de esta mezcla tendrá en las prestaciones del motor, así como en sus emisiones. Las emisiones de este sistema deben ser menores que las de únicamente Diesel para que este proceso sea beneficioso para el medio ambiente.

Como la legislación varía fuertemente entre países, se estudia además la legalidad de usar aceite como combustible y de las modificaciones necesarias en España. De no ser legal esta práctica en España, el estudio sigue teniendo el propósito de buscar el beneficio ecológico del uso de aceite de girasol como combustible.

Se comprueba y comenta el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la ONU por parte del proyecto.

METODOLOGÍA

Para la realización de este proyecto se van a emplear estudios, datos y publicaciones realizadas por otros investigadores. Una vez se ha extraído la información relevante de ellos, se realizan los cálculos necesarios para este estudio, se representan de la manera más conveniente y se extraen las conclusiones. Los componentes de las modificaciones se han buscado en páginas web de suministros, como RS o Amazon.

Capítulo 5. DESARROLLO DEL PROYECTO

Primero se comprobará la legalidad de las prácticas e ideas que se van a presentar en este proyecto, para después obtener los datos relevantes para obtener las emisiones, diseñar las modificaciones, determinar la mezcla correcta, etc.

LEGISLACIÓN

Antes de poder plantearse la viabilidad técnica y económica, las modificaciones que necesita un motor para funcionar con aceite de girasol o las consecuencias que esto tendría, es necesario estudiar si es legal realizar estas prácticas. Hay dos áreas en las que es necesario investigar la legalidad de usar aceite vegetal en un motor Diesel, en especial, uno destinado al transporte. Estas áreas son, la legalidad de usar aceite como combustible y la legalidad de las modificaciones necesarias para que se pueda usar el aceite con ese fin.

USO DE ACEITE VEGETAL COMO COMBUSTIBLE

En España es legal usar aceite vegetal como combustible, pero es necesario tener en cuenta que no se puede emplear el aceite que está a la venta en cualquier tienda. El aceite de girasol comprado, por ejemplo, en un supermercado, está destinado a la alimentación, tiene un impuesto específico por este motivo y se beneficia de tener un IVA reducido del 10%. La utilización de aceites vegetales destinados al uso alimentario como combustible está prohibida al no pagar el impuesto a los hidrocarburos y las sanciones correspondientes están descritas más adelante. En España, todos los combustibles deben estar gravados por el impuesto a los hidrocarburos. Este impuesto está descrito en el BOE, en la Ley 38/1992

sobre impuestos especiales (capítulo VII, Impuesto sobre Hidrocarburos) y varía según el tipo de combustible. El artículo 46 describe el ámbito al que se aplica este impuesto y los combustibles a los que se aplica. El apartado 1.g).2º dice: Los productos clasificados en los códigos NC 1507 a 1518, ya se utilicen como tales o previa modificación o transformación química, incluidos los productos clasificados en los códigos NC 2710.20, 3826.00.10 y 3826.00.90 obtenidos a partir de aquellos. El aceite de girasol es código NC 1512, y el resto de los aceites vegetales están clasificados en el resto de los códigos entre NC 1507 y 1518. El impuesto a los hidrocarburos se aplica tanto para el aceite refinado virgen, como para el aceite refinado ya usado previamente para otro fin como cocinar. Por lo tanto, el uso de aceites vegetales como combustibles es legal, pero debe estar gravado por el impuesto a los hidrocarburos.

El artículo 48 describe la base imponible de los combustibles como el volumen de los productos a 15°C expresado en miles de litros de producto. El artículo 49 define cualquiera de los aceites vegetales clasificados en el artículo 46.1.g).2º como biodiesel y tendrán el mismo impuesto que este combustible. Para saber el impuesto a pagar por los aceites vegetales, en el artículo 50 está descrito el valor para cada categoría de hidrocarburo. En el epígrafe 1.14 de la tarifa 1ª de este artículo se encuentra el biodiesel para uso como carburante. Esto significa que, para la combustión en cualquier tipo de motor, el impuesto a pagar es de 307 euros por 1.000 litros de tipo general y 72 euros por 1.000 litros de tipo especial. El tipo al que está sujeta esta operación es el general, por lo que el impuesto tanto del aceite vegetal como del Biodiesel será de 307€ cada 1000 litros. También en el artículo 50, pero en el epígrafe 1.3 se indica que impuesto del Diesel convencional o gasóleo también es de 307€ cada 1000 litros.

El artículo 55 describe las sanciones por no cumplir la normativa. Estas sanciones dependen sobre todo de los caballos fiscales del motor en el que se ha cometido la infracción y de si se ha cometido esta infracción con anterioridad. Si es así, la multa se duplica con respecto a la primera ocasión.

MODIFICACIONES DEL SISTEMA DE COMBUSTIBLE

El objetivo de este estudio es valorar el uso de aceites vegetales en motores Diesel fundamentalmente para el transporte. Con esto en mente, al realizar modificaciones en un vehículo que circula por las carreteras públicas, estas deben constar en la ficha técnica del vehículo y estar aprobadas por la ITV. La normativa sobre las modificaciones realizadas a vehículos está escrita en el MANUAL DE REFORMAS DE VEHÍCULOS de marzo de 2018.

En este extenso documento nos vamos a centrar solo algunos apartados. Las categorías de vehículos relevantes para este estudio son M, vehículos destinados al transporte de personas, y N, vehículos destinados al transporte de mercancías. Las modificaciones que se realizarían sobre los vehículos están concentradas en el tanque de combustible y el sistema de entrega de combustible, por lo que los apartados relevantes son, dentro del apartado 2 Unidad Motriz, el apartado 2.2 Modificación de las características o sustitución de los elementos del sistema de alimentación de combustible y el apartado 2.7 Modificación de la ubicación, sustitución, adición o reducción del número de depósitos de combustible. Como no se trata de modificaciones muy importantes, es necesario únicamente entregar un informe de conformidad y el certificado del taller donde se ha realizado la modificación. En el informe de conformidad se describen los elementos incorporados, sustituidos o modificados, para hacer posible su identificación durante la inspección de las modificaciones. El certificado de taller incluye el taller donde se han realizado las modificaciones y los equipos empleados para este fin. Las modificaciones deben cumplir con las normativas para cada apartado. El vehículo debe cumplir únicamente con la normativa de emisiones que estaba vigente en el momento que fue matriculado por primera vez, pero el depósito de combustible debe cumplir con la normativa vigente en el momento de la tramitación de la reforma

Tras entregar esta documentación, se le realiza una inspección técnica específica al vehículo. Por las modificaciones al sistema de alimentación de combustible se inspeccionará:

- Emisiones
- Frenos

- Motor y transmisión

Por las modificaciones al depósito de combustible se inspeccionará:

- Acondicionamiento exterior, carrocería y chasis
- Motor y transmisión

CICLO DE VIDA DEL ACEITE VEGETAL

En primer lugar, se va a estudiar el ciclo de vida que tiene el aceite vegetal. El aceite se puede emplear como combustible como aceite bruto o como biodiesel después de un proceso de transesterificación. Con este estudio se pretende investigar el uso de aceite bruto, pero también es necesario conocer características del biodiesel, ya que es la principal alternativa al aceite bruto. Existen dos puntos en los que se puede obtener combustible del aceite: después de la extracción del aceite de las semillas o frutos de un vegetal y después de su primer uso, por ejemplo, como aceite de freír en una cocina. Cada punto tiene sus ventajas y características que se discutirán a continuación.

ACEITE VEGETAL COMO COMBUSTIBLE

Para justificar los beneficios medioambientales de la combustión de aceites vegetales en motores Diesel respecto a la utilización de Diesel exclusivamente, hay que tener en cuenta todas las emisiones perjudiciales. Entre estas, también se encuentran las producidas antes de la combustión en el motor. Durante el crecimiento de un cultivo, las plantas absorben CO_2 de la atmósfera mediante el proceso de fotosíntesis. Ese CO_2 se combina con agua para producir oxígeno y compuestos de carbono que necesitan para su crecimiento. Debido a que este carbono fue extraído de la atmósfera y se queda atrapado en la planta, y por lo tanto también en sus frutos, las emisiones de CO_2 que la quema del aceite provoca, son neutralizadas por el crecimiento de la planta.

La producción de aceite se divide en las siguientes fases: cultivo, transporte y extracción del aceite. Estas fases consumen energía en forma de Diesel para el transporte y la maquinaria de cultivo, en forma de electricidad y gas natural para los procesos industriales de extracción del aceite de las semillas. La necesidad de energía produce en conjunto 1190 g CO_2 equivalente por cada kg de aceite de girasol crudo. Otros aceites que se podrían emplear como combustible emiten durante su producción más gases de efecto invernadero como se aprecia en la tabla 2, en la que se incluyen también las emisiones de CO_2 equivalentes del

Diesel EN-590 durante su producción para compararlas con las de los aceites vegetales más comunes. En estas emisiones se tienen en cuenta los procesos de cultivo, transporte y extracción de los aceites y los procesos de extracción, transporte y refinado del petróleo del que se extrae el Diésel.

	g CO ₂ eq./kg
Aceite de girasol	1190
Aceite de colza	1425
Aceite de soja	2140
Aceite de palma	1600
Diesel EN-590	357,7

Tabla 2: Emisiones durante la producción de combustibles. Fuente: [6]

Las emisiones de gases de efecto invernadero este estudio también las cifra en los gramos de CO₂ que emite un vehículo en concreto por cada kilómetro recorrido. Este vehículo es un automóvil Ford Focus 1.9 TDi y más datos obtenidos del estudio del ministerio de medio ambiente están basados en sus características de consumo y emisiones con varios combustibles.

Por otra parte, el aceite que no se emplee como combustible será utilizado en otra aplicación y después estará probablemente disponible para usar su energía en un motor de combustión. El aceite que ya ha sido usado es un contaminante muy importante para la naturaleza y en las aguas residuales urbanas se encuentra a menudo aceite vegetal que ha sido desechado por los desagües y debe ser eliminado por completo antes de poder verter el agua al medio natural. Este aceite no es exclusivamente un contaminante peligroso, sino que también es un recurso valioso que se emplea actualmente para la elaboración de nuevos productos. Para tratar de limitar los vertidos y aprovechar este recurso, existe personal autorizado para la recogida de aceites vegetales usados. Las principales fuentes de aceite son la restauración y la producción de alimentos. Sin embargo, el aceite en el estado que es recogido no está preparado para ser quemado en un motor Diésel Common-Rail. Antes de esto necesita pasar por diferentes etapas de pretratamiento, que se detallarán más adelante, pero a grandes rasgos, el aceite proveniente de su uso en una cocina tiene gran cantidad de contaminantes como restos de comida y agua. Estas sustancias deben ser eliminadas mediante este

pretratamiento antes de poder usarlo como combustible o pueden causar graves daños a los sistemas que alimentan el motor de carburante.

Para contrarrestar los problemas e inconvenientes de la combustión de aceite vegetal usado en motores Diesel, este aceite tiene importantes ventajas para el medio ambiente. Si se emplea aceite vegetal como combustible que ya ha sido utilizado con anterioridad, la quema de este no tiene emisiones de CO₂ asociadas. Al estar usando un producto de desecho, no tiene emisiones asociadas a su producción y las emisiones provocadas durante la combustión en el motor quedan neutralizadas por el consumo de CO₂ que la planta tuvo durante su crecimiento.

BIODIESEL DE ACEITE VEGETAL

El aceite vegetal también puede ser empleado como combustible en forma de biodiesel y se puede usar también en los mismos dos puntos de su vida: después de su extracción y después de un primer uso. Al igual que el uso de aceite vegetal exclusivamente, el biodiesel producido a base de aceite vegetal crudo tiene incluidas las emisiones durante su producción y el producido a base de aceite vegetal usado no tiene emisiones anteriores asociadas.

Si se trata de aceite usado, después de ser recogido, necesita un pretratamiento antes del proceso de transformación en Biodiesel. En este pretratamiento, se neutralizan los ácidos grasos con una base como sosa cáustica, se elimina el color que tenga y se filtra para eliminar impurezas. A partir de aquí los procesos son iguales para ambos aceites.

La transformación del aceite en biodiésel ocurre mediante un proceso llamado transesterificación. En este proceso, se le añade un alcohol al aceite vegetal que, en presencia de un catalizador, reacciona para formar ésteres de ácidos grasos y glicerina. La glicerina es un subproducto de este proceso que se vende para su uso industrial o cosmético.

En el estudio se han analizado diferentes mezclas de Diésel y biodiésel denominadas BD, seguido del porcentaje de biodiésel, A y un número dependiendo del origen del aceite (1

para aceite bruto y 2 para aceite usado). Así la mezcla BD10A2 tiene un 10% de biodiésel procedente de aceite usado y un 90% de Diésel EN-590. El biodiésel no está producido de un aceite vegetal en exclusiva, sino de una mezcla de aceites. En este caso, el biodiésel es de una mezcla de 40% aceite de soja, 25% aceite de colza, 25% aceite de palma y 10% aceite de girasol. La tabla 3 muestra algunas características de las mezclas de biodiesel (densidad, poder calorífico inferior y contenido en azufre), así como el consumo de combustible que tiene el Ford Focus mencionado anteriormente con cada combustible.

	Densidad (kg/l)	PCI (MJ/kg)	S (kg/t)	Consumo (l/km)
BD5A1	0,837	41,62	0,048	0,05416
BD10A1	0,840	41,38	0,045	0,05433
BD100A1	0,880	37,31	0,003	0,05747
BD5A2	0,838	41,63	0,048	0,05412
BD10A2	0,840	41,42	0,046	0,05423
BD100A2	0,887	37,70	0,010	0,05643
Diésel EN-590	0,835	41,85	0,050	0,05400

Tabla 3: Datos de diferentes mezclas de Biodiesel y Diesel. Fuente: [6]

En cuanto al contenido en azufre del Diesel EN-590, la normativa ha cambiado desde el momento que se escribió el estudio en el que se basa la tabla. En el año 2006, la normativa vigente era la Euro IV, que obliga al Diesel a contener un 0,005% de azufre o menos y este combustible cumple la normativa. Desde entonces, con las nuevas normativas Euro V y Euro VI, el contenido en azufre se ha reducido hasta el 0,001%. Con esta normativa en vigor, el Diesel empleado en el estudio no cumple la normativa. Por el contrario, el Biodiesel sigue cumpliendo con la estricta normativa actual, debido al bajo contenido en azufre del aceite vegetal.

Las emisiones provocadas por cada mezcla están presentadas en el estudio en gramos de CO₂ equivalente por cada kilómetro recorrido por el vehículo anteriormente descrito. Si este

dato se divide entre el consumo del coche y entre la densidad del combustible obtenemos las emisiones por kilogramo de combustible usado, mostradas en la tabla 4

$$Emisiones \left[\frac{g \text{ CO}_2 \text{ equiv}}{kg} \right] = \frac{Emisiones \left[\frac{g \text{ CO}_2 \text{ equiv}}{km} \right]}{Q \left[\frac{l}{km} \right] * \rho \left[\frac{kg}{l} \right]}$$

	Emisiones durante la Producción	
	g CO ₂ eq. /km	gCO ₂ eq. /kg
BD5A1	18,71	412,73
BD10A1	21,32	467,16
BD100A1	66,67	1318,28
BD5A2	16,19	356,98
BD10A2	16,15	354,53
BD100A2	14,68	293,29
Diésel EN-590	16,13	357,73

Tabla 4: Emisiones de CO₂ eq. durante la producción de diferentes mezclas de Biodiesel y Diesel. Fuente: elaboración propia

De la tabla 4 es muy interesante lo bajas que son las emisiones del Diesel durante su producción, mientras que los aceites tienen emisiones mayores en esta etapa.

Las emisiones de la producción de los biodiésel provenientes de aceites vegetales brutos podrían ser reducidas utilizando una mezcla distinta de aceites. El más ventajoso sería el aceite de girasol, debido a sus bajas emisiones durante la producción del aceite. Si se emplea solo aceite de girasol para la producción de biodiésel, las emisiones se reducen como se muestra en la tabla 5.

	Emisiones durante la producción	
	g CO ₂ eq. /km	gCO ₂ eq. /kg
BD5A1	17,71	390,67
BD10A1	20,32	445,25
BD100A1	51,87	1025,63
BD5A2	16,19	356,98
BD10A2	16,15	354,53
BD100A2	14,68	293,29
Diésel EN-590	16,13	357,73

Tabla 5: Emisiones de CO₂ eq. durante la producción de diferentes mezclas de Biodiesel de aceite de girasol y Diesel. Fuente: elaboración propia.

Debido a que las emisiones durante la producción del aceite no se tienen en cuenta para el cálculo de emisiones totales de los biodiésel provenientes de aceites vegetales usados, independientemente del tipo de aceite utilizado, las emisiones se mantienen constantes.

EMISIONES DURANTE LA COMBUSTIÓN

Otra parte de las emisiones provocadas por el transporte es durante la combustión. Para estudiar las emisiones que las mezclas de Diesel y aceite de girasol van a provocar, en primer lugar, se va a obtener las emisiones de la combustión de Diesel para después calcular las emisiones de la combustión de aceite de girasol por separado. Como se pretende calentar la mezcla antes de alimentar el motor de combustible y su volumen aumentará en el proceso, los cálculos se realizarán en función de masa para más adelante obtener las mezclas por volumen. También se van a calcular y comparar las emisiones de las mezclas de Diesel y Biodiesel, al ser la principal alternativa al aceite vegetal.

EMISIONES DE EFECTO INVERNADERO DEL DIESEL

Los fabricantes de vehículos indican las emisiones de CO₂ de sus vehículos en gramos por kilómetro recorrido por el vehículo, pero además de CO₂, la quema de Diesel emite otros gases de efecto invernadero que se deben tener en cuenta para el cálculo de emisiones. Los principales gases emitidos que contribuyen al calentamiento global son, además del CO₂, el metano (CH₄) y el óxido nitroso (N₂O).

Partiendo de las masas de gases emitidos por kilómetro recorrido se obtienen, multiplicando por los potenciales de calentamiento, los gramos de CO₂ que equivalen estas emisiones. Estos después se dividen entre el consumo y la densidad del Diesel para obtener estas emisiones en gramos de CO₂ equivalente por cada kg de combustible empleado.

$$Eeq_{km} = E_{km} * P_{cal}$$

$$Eeq_v = \frac{Eeq_{km}}{Q}$$

$$Eeq_m = \frac{Eeq_v}{\rho}$$

Donde E_{km} son las emisiones por kilómetro recorrido $\left[\frac{g}{km}\right]$, $E_{eq_{km}}$ son las emisiones de CO₂ equivalente por kilómetro recorrido $\left[\frac{g\ CO_2\ equiv}{km}\right]$, E_{eq_v} son las emisiones de CO₂ equivalente por litro de combustible $\left[\frac{g\ CO_2\ equiv}{l}\right]$, E_{eq_m} son las emisiones de CO₂ equivalente por kilogramo de combustible $\left[\frac{g\ CO_2\ equiv}{kg}\right]$, P_{cal} es el potencial de calentamiento de los gases[], Q es el consumo de combustible $\left[\frac{l}{km}\right]$ y ρ es la densidad del combustible $\left[\frac{kg}{l}\right]$.

Los resultados de estos cálculos se recogen en la tabla 6.

		Emisiones durante la combustión			
		E_{km}	$E_{eq_{km}}$	E_{eq_v}	E_{eq_m}
		g /km	g CO ₂ eq. /km	g CO ₂ eq. /l	g CO ₂ eq. /kg
Diesel	CO2	142,31	142,31	2635,37	3156,13
	N2O	0,0132	4,092	75,778	90,752
	CH4	0,0117	0,246	4,550	5,449
	Total		146,65	2715,70	3252,33

Tabla 6: Emisiones durante la combustión de Diesel. Fuente: elaboración propia.

EMISIONES DE EFECTO INVERNADERO DEL ACEITE DE GIRASOL

A continuación, calculamos las emisiones provocadas por la quema de aceite de girasol. Como se ha mencionado con anterioridad, las emisiones de CO₂ durante la quema de aceite vegetal quedan neutralizadas por la absorción de CO₂ por parte de la planta que produjo la semilla o el fruto del que se extrae el aceite. Por este motivo, no se tiene en cuenta el CO₂ emitido en este punto para el cálculo de emisiones durante el uso. De hecho, las plantas absorben cantidades mucho mayores de carbono en forma de CO₂ que la cantidad de carbono que queda atrapado en el aceite de esa planta, al existir gran cantidad de materia orgánica en

la planta que no se puede emplear para generar aceite. De modo que se absorbe mayor cantidad de CO₂ de la atmósfera del que será producido durante la combustión.

No se tienen datos de las emisiones de metano y óxido nitroso en la quema de aceite por lo que se supone que son similares a las del Diesel y teniendo en cuenta que las plantas absorben cantidades mayores de carbono que el atrapado en el aceite, la estimación de emisiones está por encima de la cantidad real. Las emisiones de metano y óxido nitroso no quedan canceladas por el crecimiento de la planta ya que no son gases que la plantas absorban.

En la tabla 7 se muestran las emisiones netas provocadas durante la combustión de aceite de girasol. Las emisiones brutas provocadas durante la combustión estarían cercanas al Diesel.

		Eeq _m
		g CO ₂ equiv./kg
Aceite de girasol	CO ₂	0
	N ₂ O	90,752
	CH ₄	5,449
	Total	96,20

Tabla 7: Emisiones durante la combustión de aceite de girasol. Fuente: elaboración propia.

Las emisiones en este apartado son idénticas tanto para aceite de girasol crudo como para aceite usado.

EMISIONES DE EFECTO INVERNADERO DEL BIODIESEL

La tabla 8 muestra las emisiones de gases de efecto invernadero del Biodiesel y se calcula del mismo modo que las emisiones de Diesel usando las fórmulas descritas en el apartado de las emisiones de efecto invernadero del Diesel.

		Emisiones durante la combustión			
		E_{km}	$E_{eq_{km}}$	E_{eq_v}	E_{eq_m}
		g /km	g CO ₂ eq. /km	g CO ₂ eq. /l	g CO ₂ eq. /kg
BD100A1	CO ₂	0	0	0	0
	N ₂ O	0,0132	4,092	71,202	80,912
	CH ₄	0,0117	0,2457	4,275	4,858
	Total		4,34	75,48	85,77
BD100A2	CO ₂	0	0	0	0
	N ₂ O	0,0132	4,092	72,515	81,753
	CH ₄	0,0117	0,2457	4,354	4,909
	Total		4,34	76,87	86,66

Tabla 8: Emisiones durante la combustión de Biodiesel. Fuente: elaboración propia.

EMISIONES DE MEZCLAS DE DIESEL-ACEITE DE GIRASOL Y DIESEL-BIODIESEL

A continuación, se van a comparar las emisiones durante todo el proceso, tanto producción como uso del combustible, de los aceites y biodiéseles en mezclas con Diesel.

En la tabla 9 se muestra el poder calorífico de los componentes para poder calcular esta propiedad de las distintas mezclas.

	Poder calorífico (MJ/kg)
Diesel	45,45
Aceite bruto	38,86
Aceite usado	39,31
Biodiesel A1	37,31
Biodiesel A2	37,70

Tabla 9: Poder calorífico de los componentes de las mezclas. Fuente: elaboración propia.

$$E_T = E_P + E_C$$

$$E_E = \frac{E_T}{PCI}$$

Donde E_T son las emisiones totales $\left[\frac{g\ CO_2\ equiv}{kg}\right]$, E_P son las emisiones durante la producción $\left[\frac{g\ CO_2\ equiv}{kg}\right]$, E_C son las emisiones durante la combustión $\left[\frac{g\ CO_2\ equiv}{kg}\right]$ y PCI es el poder calorífico inferior $\left[\frac{MJ}{kg}\right]$.

En la tabla 10 se muestran las emisiones durante la producción, la combustión y el total, así como el poder calorífico inferior (PCI) y las emisiones por unidad de energía de las mezclas de Diesel y aceite de girasol tanto crudo como usado.

		Emisiones durante las etapas			PCI	Emisiones por unidad de energía
		Producción	Combustión	Total		
		g CO ₂ eq. /kg	g CO ₂ eq. /kg	g CO ₂ eq. /kg	MJ/kg	g CO ₂ eq. /MJ
Mezcla Diesel- Aceite de Girasol Crudo (Porcentaje de masa del aceite)	0	357,73	3252,33	3610,06	41,85	86,26
	10	440,96	2936,72	3377,68	41,55	81,29
	20	524,18	2621,11	3145,29	41,25	76,25
	30	607,41	2305,49	2912,90	40,95	71,13
	40	690,64	1989,88	2680,52	40,65	65,93
	50	773,86	1674,27	2448,13	40,36	60,66
	60	857,09	1358,65	2215,75	40,06	55,31
	70	940,32	1043,04	1983,36	39,76	49,89
	80	1023,55	727,43	1750,97	39,46	44,37
	90	1106,77	411,81	1518,59	39,16	38,78
	100	1190,00	96,20	1286,20	38,86	33,10
Mezcla Diesel- Aceite de Girasol Usado (Porcentaje de masa del aceite)	0	357,73	3252,33	3610,06	41,85	86,26
	10	321,96	2936,72	3258,68	41,60	78,34
	20	286,18	2621,11	2907,29	41,34	70,32
	30	250,41	2305,49	2555,90	41,09	62,21
	40	214,64	1989,88	2204,52	40,83	53,99
	50	178,86	1674,27	1853,13	40,58	45,67
	60	143,09	1358,65	1501,75	40,32	37,24
	70	107,32	1043,04	1150,36	40,07	28,71
	80	71,55	727,43	798,97	39,81	20,07
	90	35,77	411,81	447,59	39,56	11,31
	100	0,00	96,20	96,20	39,31	2,45

Tabla 10: Emisiones totales de las mezclas de aceite de girasol y Diesel. Fuente: elaboración propia.

En la tabla 10 se observa como la energía almacenada en el aceite de girasol tiene menores emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a su ciclo de vida completo en comparación con el Diesel. Por lo que cualquier cantidad de aceite que se le añada al Diesel reduce las emisiones por el uso de esa mezcla respecto a Diesel exclusivamente. Si además el aceite ha sido utilizado anteriormente, los resultados de emisiones se reducen aún más al igual que las emisiones por unidad de energía.

En la tabla 11 se muestran los mismos parámetros que en la tabla anterior, pero para los Biodiéseles.

		Emisiones durante las etapas			PCI	Emisiones por unidad de energía
		Producción	Combustión	Total		
		g CO ₂ eq./kg	g CO ₂ eq./kg	g CO ₂ eq./kg	MJ/kg	g CO ₂ eq./MJ
Mezcla Diesel-Biodiesel de Aceite crudo (Porcentaje de masa de Biodiesel)	0	357,73	3252,33	3610,06	41,85	86,26
	10	453,78	2935,68	3389,46	41,40	81,88
	20	549,84	2619,02	3168,86	40,94	77,40
	30	645,89	2302,36	2948,26	40,49	72,82
	50	838,00	1669,05	2507,05	39,58	63,34
	100	1318,28	85,77	1404,05	37,31	37,63
Mezcla Diesel-Biodiesel de Aceite usado (Porcentaje de masa de Biodiesel)	0	357,73	3252,33	3610,06	41,85	86,26
	10	351,28	2935,77	3287,05	41,44	79,33
	20	344,84	2619,20	2964,04	41,02	72,26
	30	338,40	2302,63	2641,03	40,61	65,04
	50	325,51	1669,50	1995,01	39,78	50,16
	100	293,29	86,66	379,95	37,70	10,08
Mezcla Diesel-Biodiesel de Aceite crudo exclusivamente de Girasol (Porcentaje de masa de Biodiesel)	0	357,73	3252,33	3610,06	41,85	86,26
	10	424,52	2935,68	3360,20	41,40	81,17
	20	491,31	2619,02	3110,33	40,94	75,97
	30	558,10	2302,36	2860,46	40,49	70,65
	50	691,68	1669,05	2360,73	39,58	59,64
	100	1025,63	85,77	1111,40	37,31	29,79

Tabla 11: Emisiones totales de mezclas de Biodiesel y Diesel. Fuente: elaboración propia.

Si se comparan estos resultados con las emisiones de las mezclas Diesel-aceite, se observa que el biodiesel tiene unas emisiones superiores para mezclas con la misma proporción de Diesel. Si el biodiesel está producido exclusivamente con aceite de girasol crudo, sus mezclas con Diesel tienen emisiones menores que las mezclas de aceite de girasol crudo y Diesel. Si el aceite de Girasol ha sido utilizado con anterioridad, la quema de la mezcla con Diesel emite menos gases de efecto invernadero que si el aceite de transformase en biodiesel antes de ser quemado.

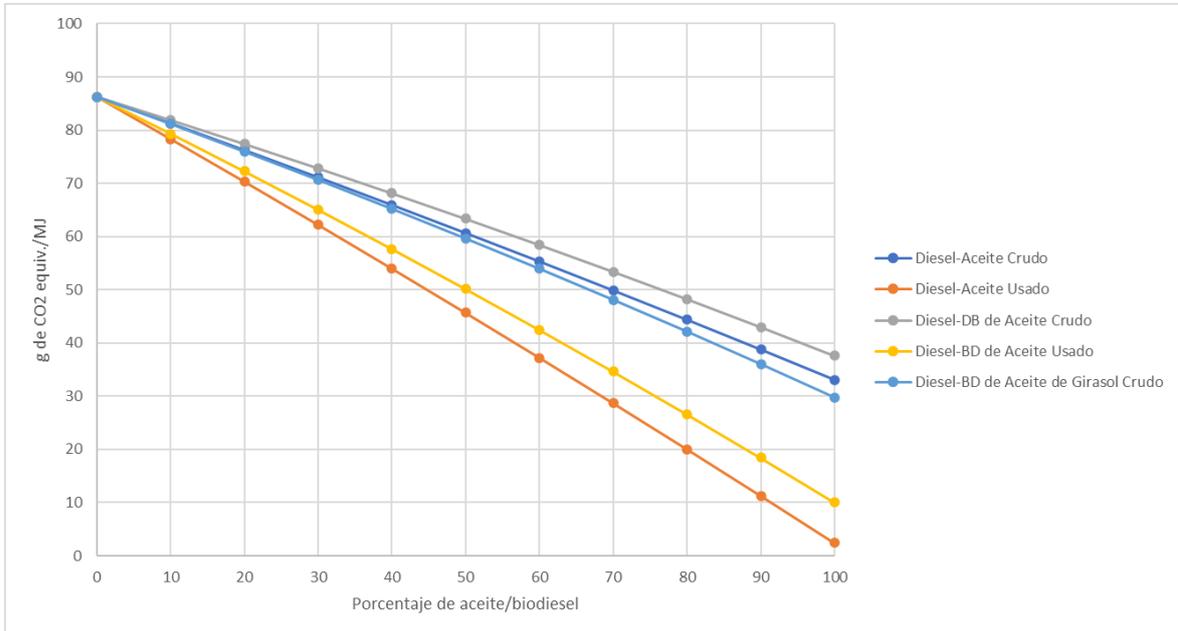


Figura 1: Emisiones por unidad de energía frente a porcentaje de combustible alternativo de la mezcla.

Fuente: elaboración propia.

EMISIONES CONTAMINANTES

A parte de los gases de efecto invernadero anteriormente mencionados, existen otras emisiones contaminantes provocadas por motores Diesel que contaminan la atmósfera. Las principales son los óxidos de nitrógeno (NO_x) y los óxidos de azufre (SO_x).

ÓXIDOS DE NITRÓGENO

Los óxidos de nitrógeno son de gran preocupación en las emisiones de los motores Diesel. Mientras que los motores de gasolina funcionan con dosado estequiométrico, los motores Diesel funcionan variando constantemente el dosado en la cámara de combustión. Cuando se requiere mayores prestaciones del motor, se enriquece la mezcla de aire y combustible y el motor produce más potencia. Al funcionar gran cantidad de tiempo por debajo de la mezcla aire-combustible estequiométrica, el exceso de oxígeno durante la combustión junto con las altas temperaturas en la cámara de combustión producen óxidos de nitrógeno. Los óxidos de nitrógeno (NO_x) son capaces de reaccionar con sustancias de la atmósfera y producir:

- niebla fotoquímica, que provoca enfermedades respiratorias e irritación ocular
- nitrato de peroxiacetilo, que provoca afecciones pulmonares e irritación ocular
- lluvia ácida (HNO_3): deforestación

El aire que absorbe el motor para funcionar es nitrógeno en su mayoría, por lo que no se puede evitar que en la cámara de combustión haya nitrógeno. No obstante, los motores Diesel modernos tienen unos dispositivos que tratan de evitar que en la cámara de combustión exista exceso de oxígeno. Estos dispositivos, las válvulas EGR (Exhaust Gas Recirculation), introducen gases de escape de vuelta al motor. Habitualmente estos gases se enfrían primero para evitar alterar en exceso la combustión y evitar dañar la admisión con las altas temperaturas. Los gases de escape están ya libres de oxígeno, por lo que, al introducirlos en la admisión, ocupan volumen de la cámara de combustión sin reaccionar durante la explosión. Esto permite que el ordenador de control de motor regule la cantidad

de aire atmosférico que precisa para quemar el combustible que se inyecta sin exceso de oxígeno que formaría óxidos de nitrógeno.

Como se puede apreciar en la figura 2, al añadir aceite de girasol al combustible bajan las emisiones de óxidos de nitrógeno, tanto para aceite crudo como usado. Aunque la mezcla exacta que se empleará no se conozca aún, las emisiones de óxidos de nitrógeno disminuyen independientemente de la proporción de aceite de girasol empleada.

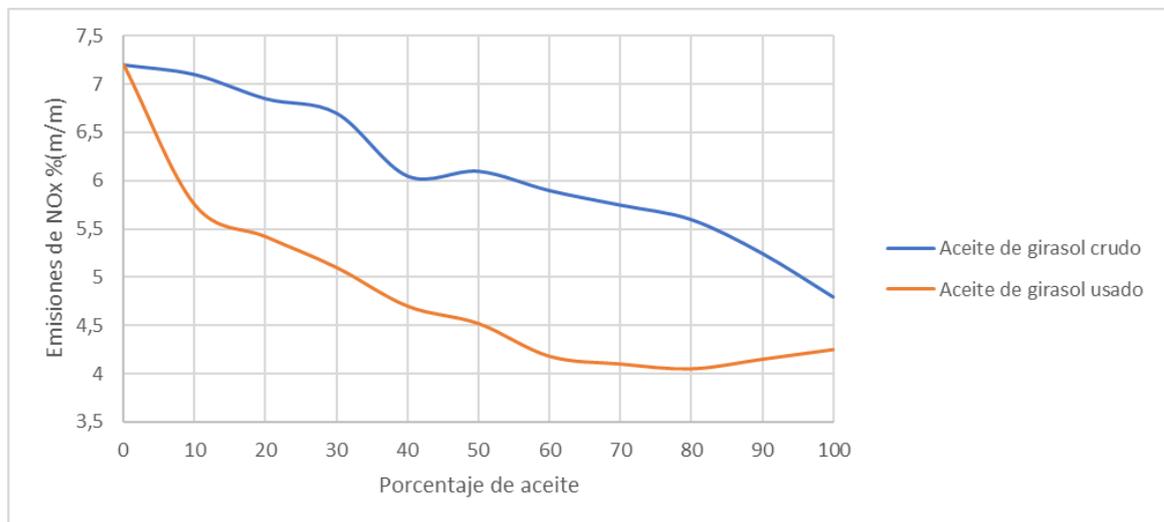


Figura 2: Emisiones de óxidos de nitrógeno frente al porcentaje de aceite. Fuente: elaboración propia.

Una vez los gases han salido del motor, algunos vehículos disponen de sistemas para reducir las emisiones de óxidos de nitrógeno como catalizadores o sistemas de inyección de urea. El funcionamiento de estos sistemas se basa en la reducción de los óxidos de nitrógeno. Los catalizadores realizan esta reacción mediante metales preciosos como el platino y el rodio y separan los óxidos de nitrógeno en oxígeno y nitrógeno, los gases que forman el 99% de la atmósfera y no provocan contaminación. Los sistemas de inyección de urea producen nitrógeno y agua con la siguiente reacción: $4NO + 4NH_3 + O_2 = 4N_2 + 6H_2O$. Estos sistemas tienen una eficiencia inferior a los catalizadores y necesitan ser rellenados de urea

a medida que se consume, pero los catalizadores son más costosos y se emplean más comúnmente en motores de gasolina que en motores Diesel.

ÓXIDOS DE AZUFRE

Por otra parte, las emisiones de óxidos de azufre, también peligrosas para el medio ambiente, no se deben a las características de la combustión de estos motores. El azufre que forma estos compuestos viene del petróleo del que se extrae el Diesel. La quema de combustibles con azufre libera trióxido de azufre (SO_3) que al combinarse con agua en la atmósfera produce ácido sulfúrico (H_2SO_4), que genera lluvia ácida. No obstante, existen métodos para eliminar parte del azufre que contiene el Diesel tal y como sale de la destilación de petróleo. El proceso se denomina hidrodesulfuración y existen normativas para limitar los niveles de azufre en el Diesel. La normativa EN-590 limita el contenido en azufre del Diesel de automoción Euro VI en 0,001% del peso, 10 mg/kg.

La desulfurización del Diesel para conseguir contenidos de azufre reducidos provoca la pérdida de propiedades lubricantes. La lubricidad del combustible es especialmente importante en motores Diesel. Para recuperar la lubricidad del combustible es necesario incorporar aditivos o mezclar una cantidad de Biodiesel. Según la normativa EN-590, el Diesel puede contener hasta un 7% de Biodiesel y con esta pequeña cantidad la lubricidad del combustible mejora notablemente. Además, la normativa EN-14214, que regula el Biodiesel, obliga a que este contenga también menos de 10mg/kg de azufre.

	Diesel	Aceite de Girasol Crudo	Aceite de Girasol Usado	BD100A1	BD100A2
Contenido en Azufre (%)	0,0010	0,00213	0,00234	0,0003	0,0010

Tabla 12: Contenido en azufre de los combustibles. Fuente: elaboración propia.

Como se observa en la tabla 12, pese a que el aceite de girasol tiene un contenido en azufre muy bajo, está por encima del máximo permitido en la normativa de Biodiesel EN-14214, de 0,001%. La transformación en Biodiesel reduce el contenido en azufre y entra dentro de

la normativa. Aunque es superior al Diesel actual, el contenido en azufre del aceite de girasol es inferior a la mitad del contenido del Diesel Euro-IV, antes del año 2009.

OTRAS EMISIONES CONTAMINANTES

Además de los óxidos de nitrógeno y de azufre, existen otras emisiones contaminantes para el medio ambiente. Las emisiones de partículas son generalmente mayores en los motores Diesel que en los motores gasolina y producen afecciones respiratorias a los humanos. Las emisiones de hidrocarburos, combustible sin quemar completamente, son un componente, junto con los óxidos de nitrógeno, para la creación de smog fotoquímico. Este contaminante es muy abundante en las ciudades y ataca a las vías respiratorias y a las mucosas. El monóxido de carbono también es producido por estos motores, pero en menor medida que en los motores de gasolina, debido al funcionamiento con una mezcla aire-combustible pobre de los Diesel. Este contaminante es muy tóxico y tiene efectos sobre los aparatos circulatorio y respiratorio. El uso de aceite de girasol en motores Diesel provoca el aumento de todos estos últimos contaminantes.

PRECIO DE LOS COMBUSTIBLES

PRECIO DEL DIESEL

En el momento de redacción de este documento, 25 de mayo de 2021, el precio del Diesel medio en las gasolineras en Madrid era de 1,289 €/L. Operar el coche del estudio con Diesel supone un coste en combustible de 0,0697 €/km.

PRECIO DEL ACEITE BRUTO

Según los datos de indexmundi, el precio medio de los últimos 5 años es 706,67 €/t. El precio que tendría el aceite como combustible incluye no solo el precio de la materia prima, sino que hay que sumar los impuestos a los hidrocarburos y el IVA. El impuesto a los hidrocarburos para el aceite de girasol se calcula con su volumen a 15°C. Interpolando la densidad entre 10°C y 20°C obtenemos que la densidad a 15°C es 0,921 g/cm³.

$$P_P \left\{ \frac{\text{€}}{t} \right\} * \rho \left\{ \frac{g}{cm^3} \right\} = P_V \left\{ \frac{\text{€}}{1000L} \right\}$$

$$706,67 * 0,921 = 650,84 \left\{ \frac{\text{€}}{1000L} \right\}$$

El impuesto a hidrocarburos que le corresponde al aceite de girasol es de 307 €/1000L, como visto anteriormente. El IVA de los hidrocarburos es del 21%, gravado sobre el precio con el impuesto a hidrocarburos incluido.

$$\text{Precio con Impuesto a Hidrocarburos} = 650,84 + 307 = 957,84 \left\{ \frac{\text{€}}{1000L} \right\}$$

$$\text{Precio con IVA} = 957,84 * 1,21 = 1158,99 \left\{ \frac{\text{€}}{1000L} \right\} = 1,159 \left\{ \frac{\text{€}}{L} \right\}$$

Fuente: <https://www.indexmundi.com/es/precios-de-mercado/?mercancia=aceite-de-girasol&meses=60&moneda=eur>

PRECIO DEL ACEITE USADO

Según el estudio “Energy and cost analyses of biodiesel production from waste cooking oil”, el precio del aceite usado es de 0,65 \$/l, que en euros son 0,540 €/l. Añadiendo los impuestos como en el apartado anterior se obtiene un precio de 1,024 €/l.

PRECIO DEL BIODIESEL

El Biodiesel tiene un precio medio en España en abril de 2021 de 1,184 €/l en las pocas gasolineras que lo ofrecen. En la tabla 13 se muestran los consumos del Ford Focus y el coste que supondría el uso de Biodiesel por kilómetro recorrido.

BD100A1		BD100A2	
l/km	€/km	l/km	€/km
0,05747	0,06804	0,05643	0,06681

Tabla 13: Consumo y costes del uso de Biodiesel. Fuente: elaboración propia.

Precio obtenido de: <https://www.clickgasoil.com/c/evolucion-del-precio-biodiesel>

PRETRATAMIENTO PARA ACEITE VEGETAL USADO

De gran interés para este estudio es el uso de aceites vegetales que ya han sido empleados, principalmente en cocinas. Al reutilizar este aceite después de su primer uso, las emisiones producidas por quemar ese aceite son completamente nulas, ya que las emisiones debidas a la producción del aceite se contabilizan en su primer uso y el CO₂ expulsado durante la quema es el mismo que la planta absorbió mediante fotosíntesis para su crecimiento.

Sin embargo, la utilización de este recurso requiere de algunos pasos adicionales respecto al aceite bruto. Al haber sido ya utilizado, puede que contenga gran cantidad de impurezas, principalmente agua y restos de comida, que no se permitir que entren en el sistema de combustible. El agua causa problemas debido a que no es combustible y debido a su mayor densidad desciende al fondo del tanque, por lo que el motor puede absorber exclusivamente agua. De ocurrir esto habría que purgar el sistema de combustible entero, trabajo que necesita de un taller para realizarlo. Además, pequeñas cantidades de agua no causarían este problema, pero sí que acelerarían la corrosión de los componentes metálicos es contacto con el combustible. La presencia de restos de comida es más problemática ya que es más difícil su eliminación. Los inyectores de un sistema Common-Rail tienen unos agujeros microscópicos en la punta por los que se inyecta el combustible. Al ser tan pequeños, es fácil que se tupan si el combustible tiene impurezas. Para el Diesel existe un filtro que elimina estas impurezas antes de que puedan entrar en la bomba de inyección o los inyectores. Entre los componentes que hay que añadir al sistema se encuentra un filtro para la mezcla aceite-Diesel separado del filtro para Diesel exclusivamente. Sin embargo, si se vertiese el aceite usado directamente en el depósito, la malla filtrante de la bomba de combustible que envía la mezcla desde el tanque al resto del sistema se llenaría de partículas rápidamente y dejaría de fluir el combustible con normalidad. Esta malla es difícil de cambiar ya que se encuentra en el interior del tanque de combustible. Además, las partículas que atravesasen la malla y llegasen al filtro fino que se encuentra antes de la bomba de inyección tupidrían los poros del filtro y este quedaría inservible muy rápidamente.

Al aceite hay que realizarle un pretratamiento para evitar estos problemas. En primer lugar, el aceite va a ser filtrado en varias etapas para después separar el agua por decantación. El filtrado se realiza en varias etapas para poder eliminar residuos de cualquier tamaño y aumentar la vida de los filtros. Si se emplease exclusivamente el filtro más fino, este quedaría tupido rápidamente con residuos grandes. Eliminando los mayores contaminantes primero se consigue que cada filtro elimine los residuos que le corresponden. La primera de las fases es un tamizado que elimina residuos de hasta 1 milímetro. Después, se realizan tres fases de filtrado mediante filtros de calcetín, con tamaños de poro de 100, 10 y 1 micras en ese orden. Cuando el aceite ha pasado por todas estas fases, el contaminante en suspensión más grande que puede quedar es de 1 micra. Con un tamaño tan reducido, estas partículas pueden viajar por el sistema de alimentación de combustible sin causar problemas a ninguno de los componentes y sin afectar a la vida de los filtros del sistema. El aceite filtrado se deja a continuación reposar durante una semana para que el agua descienda al fondo y el aceite listo para usar se extrae por una salida por encima del fondo del depósito. El agua se drena por un tapón en el fondo cuando sea necesario.

Un ejemplo de componentes que se podrían usar para realizar el pretratamiento se muestra en la tabla 44 del Anexo I junto con las webs donde se encuentran disponibles.

DISEÑO DE LAS MODIFICACIONES

CIRCUITO DE COMBUSTIBLE

Para poder suministrar al motor con concentraciones relativamente altas de aceite vegetal en el combustible es necesario hacer algunas modificaciones al sistema de combustible del motor, como se muestran en la figura 3.

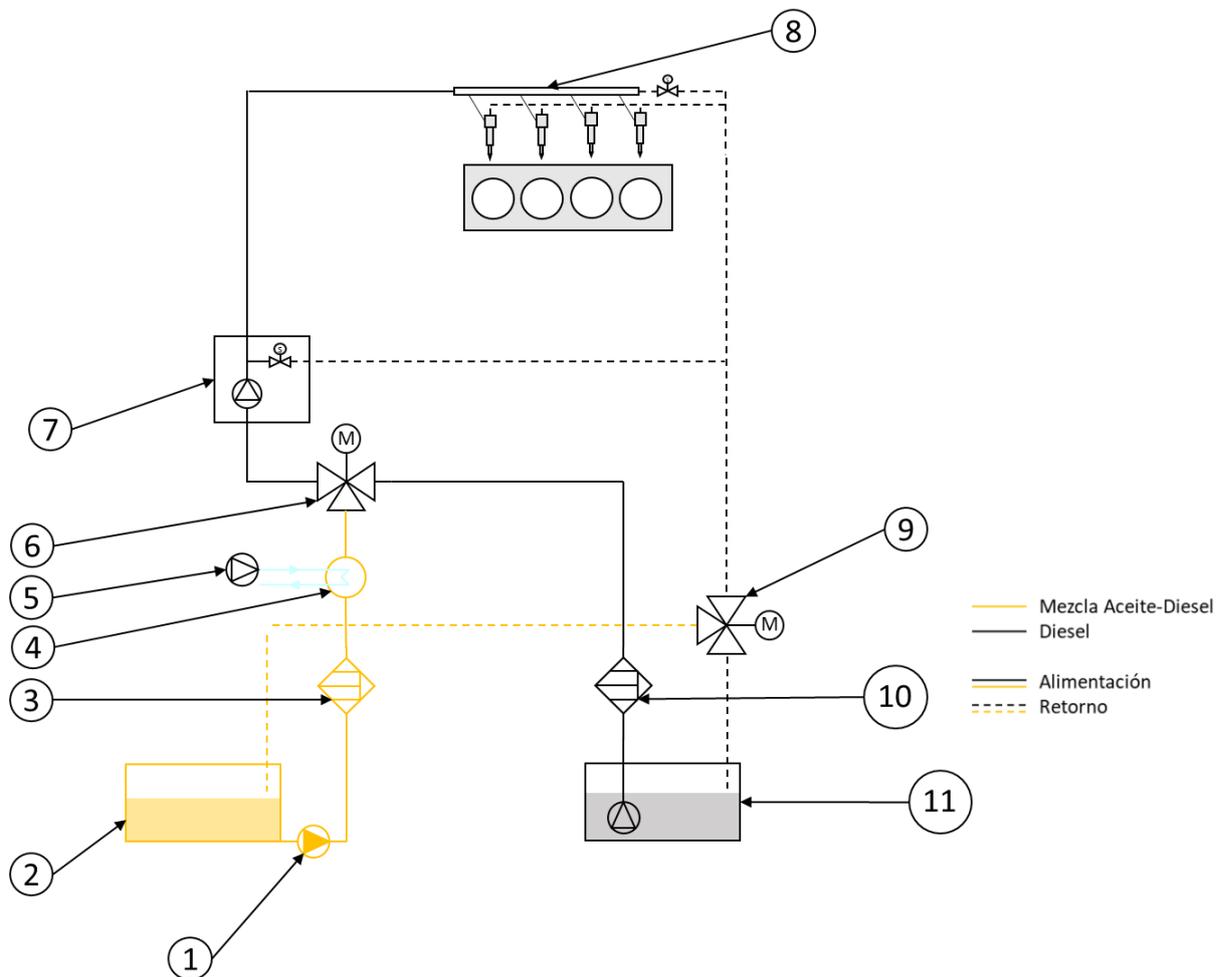


Figura 3: Modificaciones al sistema de alimentación de combustible. Fuente: elaboración propia.

En primer lugar, es necesario añadir un tanque adicional (marca 2) en el que se almacenará la mezcla de aceite y Diesel que se quiera usar una vez el motor haya alcanzado la temperatura de funcionamiento. Para llevar el combustible del tanque al motor se usa una bomba de combustible para Diesel en línea (marca 1). Se instala una bomba en línea en vez de dentro del tanque debido a que cada automóvil tendrá un tanque distinto en el que es posible que no se pueda instalar una bomba dentro del tanque y la bomba en línea es más común poder instalarla sin dificultades. Después de la bomba, la mezcla aceite-Diesel se filtra en la marca 3 y se hace circular por un intercambiador de calor de placas (marca 4). El intercambiador de calor utiliza agua del circuito de refrigeración del motor para calentar el combustible con el fin de reducir la viscosidad del combustible antes de que este entre en componentes sensibles como la bomba de inyección o los inyectores. El intercambiador está alimentado por una bomba de agua (marca 5) para garantizar suficiente flujo y calentar más la mezcla. A continuación, la mezcla entra en una válvula motorizada de 3 vías (marca 6), que permite el flujo de Diesel o de la mezcla del tanque 2 al motor. Después el combustible accede a la bomba de inyección, donde aumenta mucho su presión para la inyección y a través de la válvula de control de succión retorna al tanque. Esta válvula regula la presión que entrega la bomba al rail de inyección y permite el retorno del combustible al tanque cuando la presión excede la que el ordenador de control del motor fija. Desde el rail se distribuye el combustible hasta los inyectores. Para el funcionamiento de los inyectores, es necesario que estos descarguen parte del combustible, que regresa al tanque. El rail también dispone de una válvula para permitir que escape un exceso de presión.

Todos los retornos se unen para formar un único conducto de regreso al tanque, pero debido a que se emplean 2 tanque distintos con combustibles distintos, es necesario instalar otra válvula de 3 vías (marca 9) para dirigir el combustible que regresa al tanque que le corresponde.

Marca	Cantidad	Descripción
1	1	Bomba de Combustible BOSCH 0 580 464 084
2	1	Tanque de combustible extra- rueda de repuesto 41L
3	1	Filtro de combustible Febi Bilstein 21622
4	1	Intercambiador de calor WilTec B3-12A-10
5	1	Bomba de agua Xylem Rule il500P
6	2	Válvula de 3 vías en T Oemclima DN20 B07K7G8ZTQ

Tabla 14: Elementos del sistema de combustible. Fuente: elaboración propia.

Nota: a estos componentes hay que añadir diversos productos imprescindibles para que funcione el sistema, pero imposibles de describir con exactitud ya que dependen del vehículo en el que se instalen, como manguitos de combustible y uniones entre tuberías y componentes. Estos productos se van a cifrar en 200€ para el sistema de combustible.

Los componentes sugeridos en la tabla anterior se encuentran más desarrollados en la tabla 45 del Anexo I junto con las webs donde se encuentran disponibles.

CIRCUITO DE CONTROL ELÉCTRICO

Para controlar el sistema de combustible es necesario añadir circuitos que operen las válvulas y las bombas nuevas. Para este fin se han diseñado 3 circuitos independientes que controlan los diferentes componentes añadidos al sistema de combustible.

El circuito representado en la figura 4 corresponde al control de la válvula de 3 vías que suministra el combustible a la bomba de inyección.

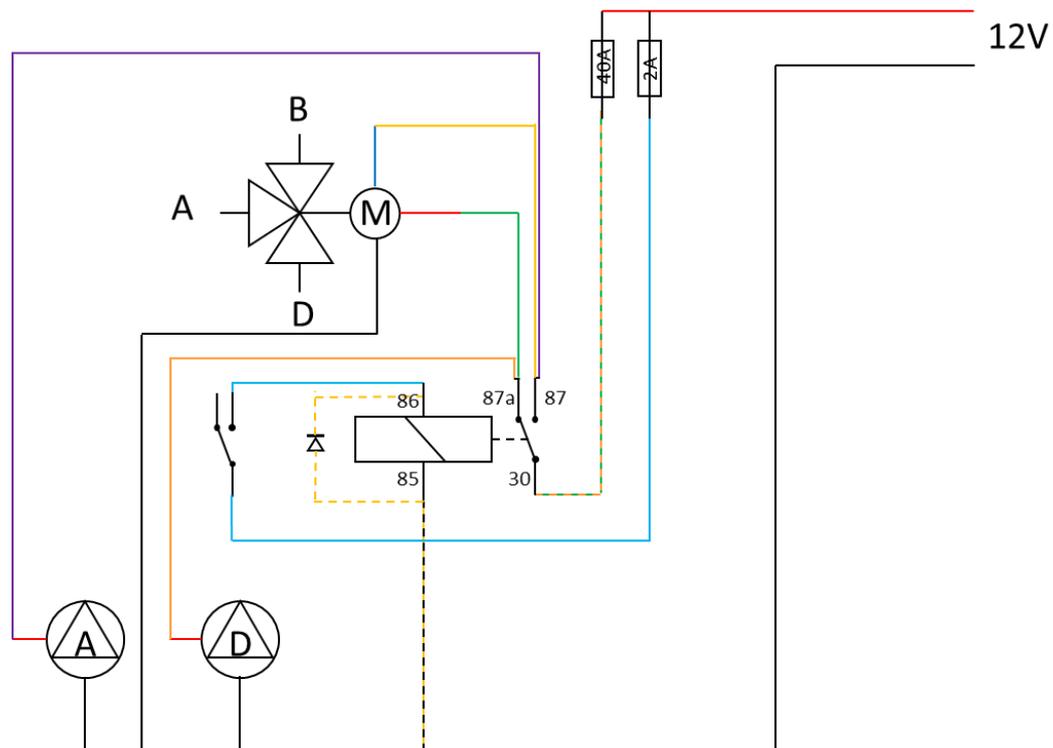


Figura 4: Control de la válvula de alimentación. Fuente: elaboración propia.

Este circuito controla también las bombas de baja presión que envían el combustible desde los depósitos al circuito de alimentación de combustible únicamente con un interruptor. En la posición inicial, la mostrada en la figura 4, se observa el funcionamiento con Diesel. La bobina del relé no está energizada, por lo que el pin 87a del relé recibe la tensión de la batería

del automóvil. Al pin 87a están conectados la bomba del tanque de Diesel y el cable rojo de la válvula de 3 vías. Cuando el cable rojo de la válvula recibe tensión, el motor que controla la válvula se activa para permitir el flujo del tanque de Diesel a la bomba de inyección. La bobina está alimentada a través de un fusible de 2A y las bombas y la válvula tienen conectado un fusible de 40A. Estos fusibles son necesarios para proteger frente a fallos eléctricos. Cuando la temperatura del circuito de refrigeración del motor alcanza su temperatura de funcionamiento y se desea cambiar a utilizar la mezcla de aceite y Diesel que está almacenada en el otro tanque, se acciona el interruptor. Esto activa la bobina del relé para interrumpir el paso de corriente al pin 87a y cerrar el circuito del pin 87. Al alimentar el cable azul de la válvula se activa el motor que la acciona y cambia la posición de la válvula para permitir el paso de combustible del tanque auxiliar e interrumpir el flujo de Diesel. A la vez, se activa la bomba del tanque auxiliar y se desconecta la bomba del tanque de Diesel. El cambio de posición tarda entre 6 y 15 segundos según el fabricante. Este proceso se repite a la inversa cuando se devuelve el interruptor a su posición inicial y el sistema alimenta el motor exclusivamente con Diesel. La bobina del relé es un componente que acciona el interruptor del relé mediante la creación de un campo magnético. Este campo también almacena una cierta cantidad de energía, que aparece cuando se pretende variar la intensidad que fluye por la bobina. La tensión que aparece en los extremos de una bobina cambia de manera violenta al cambiar esa intensidad. Por este motivo, después de tener la bobina conectada a la batería y cortar la alimentación repentinamente con el interruptor, la bobina se resiste a sufrir la bajada de intensidad a 0 creando una tensión muy elevada en sus extremos. Esta tensión podría provocar daños a los componentes del circuito. Por este motivo está instalado en paralelo con la bobina un diodo. Cuando la bobina está energizada, por el diodo no pasa corriente, ya que la tensión de la batería es menor que la tensión inversa de ruptura del diodo. Cuando se interrumpe la alimentación a la bobina, esta pretende que siga pasando la misma corriente que antes. La corriente ahora, en vez de venir de la batería, hace círculos entre el diodo y la bobina, manteniendo la tensión en la tensión de paso del diodo, 0,7 V, hasta que la energía almacenada en la bobina se disipa por efecto Joule. Los cambios de alimentación de combustible deben realizarse con el motor libre de carga, como al ralentí

o en una deceleración, para evitar que mientras se mueven las válvulas, el motor pierda aporte de combustible.

El circuito representado en la figura 5 corresponde al control de la válvula de 3 vías que envía el combustible que retorna del motor al tanque que le corresponde.

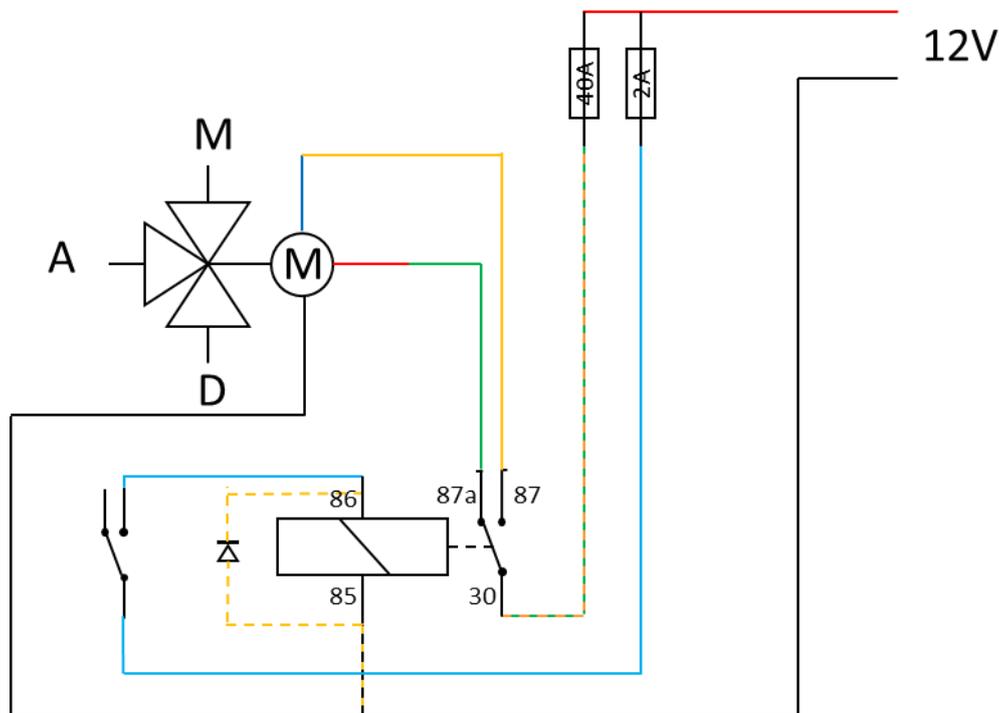


Figura 5:: Control de la válvula de retorno. Fuente: elaboración propia.

Es muy similar al circuito anterior excepto por la falta de las bombas de los tanques de combustible. Su funcionamiento es parecido, solo que el interruptor de este circuito a de ser accionado segundos después del cambio de alimentación de combustible. Al cambiar de posición la válvula del circuito de la figura 5 se alimenta el motor con un combustible distinto al que había estado usando hasta el momento, pero esto no significa que todo el sistema

cambie instantáneamente de combustible. En la bomba de inyección, en las líneas y en los inyectores queda del combustible anterior. Para evitar que gran cantidad de combustible sea enviado a través del retorno al tanque erróneo, se tiene el circuito de la figura 5. El tiempo necesario para purgar el circuito depende de cada sistema de inyección y una vez transcurrido este tiempo después del cambio en la válvula de alimentación, el conductor activa el interruptor para cambiar la de retorno. Es inevitable que algo de combustible se intercambie entre los tanques, pero debido a lo similares que son los contenidos esto no es problema alguno. Sin embargo, separando las 2 válvulas se reduce la cantidad transferida.

El circuito representado en la figura 6 corresponde al control de la bomba de agua que alimenta el intercambiador de calor con refrigerante del motor.

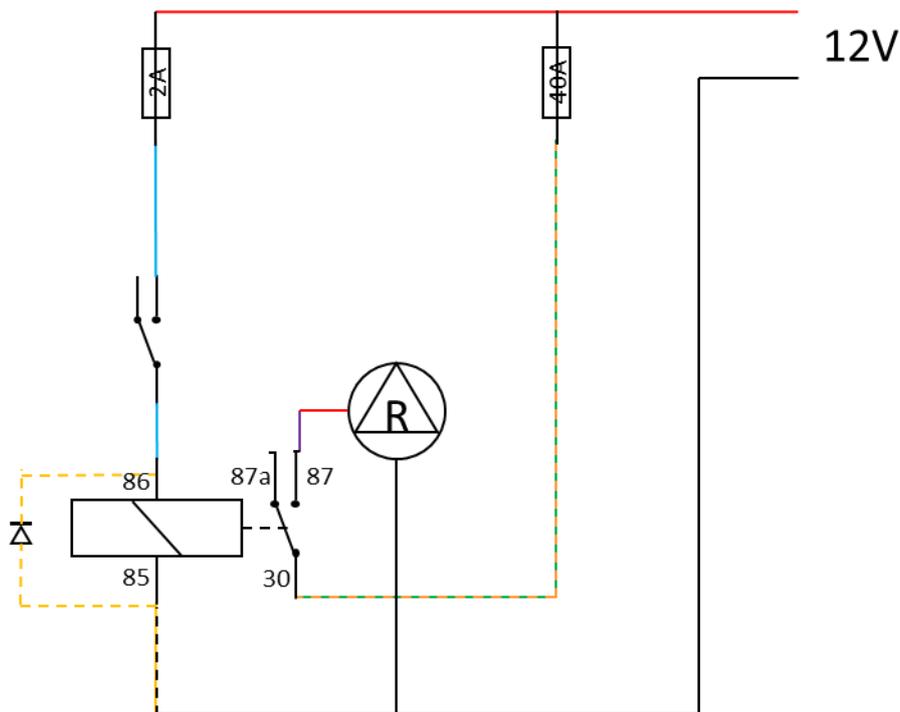


Figura 6: Control de la bomba de agua. Fuente: elaboración propia.

Los motores de los automóviles tienen una salida de agua de refrigeración para alimentar el radiador que calienta el habitáculo de los pasajeros. Con el objetivo de calentar el habitáculo lo antes posible, esta salida recibe refrigerante del bloque directamente, que se calienta antes de que el termostato se abra para permitir el flujo de refrigerante al radiador principal del motor. De esta salida se va a tomar refrigerante para el intercambiador de calor. Se añade una sección de tubería con forma de T para alimentar el intercambiador y no perder la funcionalidad de la calefacción del interior. Otra tubería en T se utilizará para unir el retorno del intercambiador y del radiador interior antes del regreso al circuito de refrigeración del motor. El circuito eléctrico está planteado igual que los anteriores.

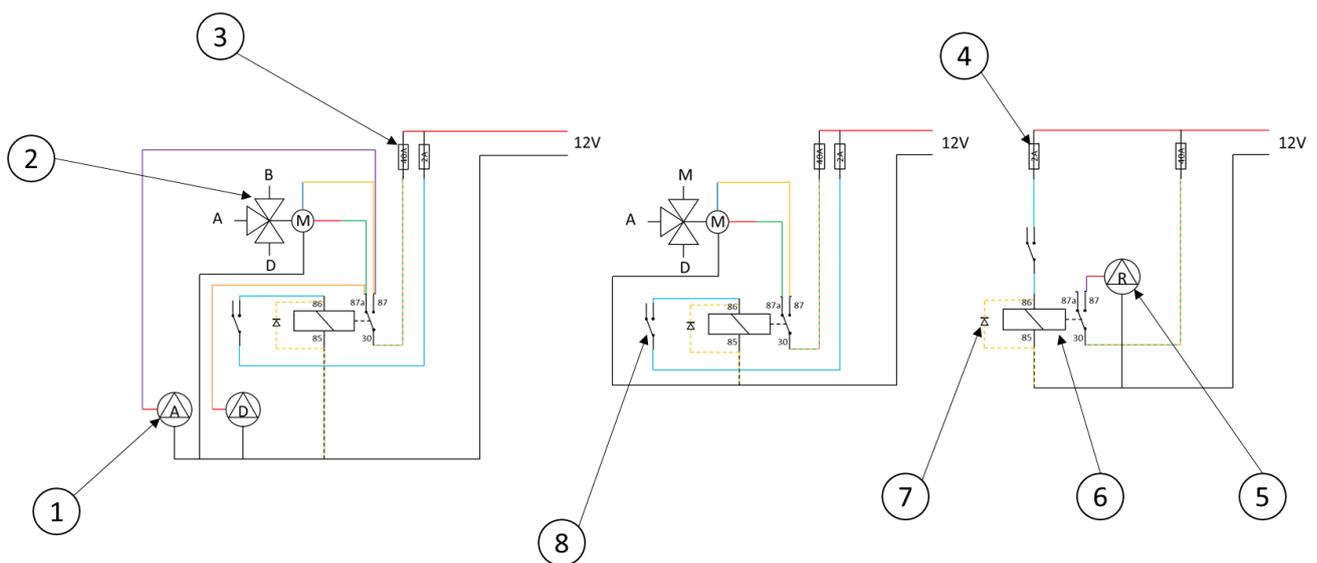


Figura 7: Circuitos eléctricos con marcas. Fuente: elaboración propia.

Marca	Cantidad	Descripción
1	1	Bomba de Combustible BOSCH 0 580 464 084
2	2	Válvula de 3 vías en T Oemclima DN20 B07K7G8ZTQ
3	3	Fusible 40A Littlefuse 0287040.PXCN
4	3	Fusible 2A Littlefuse 0287002.PXCN
5	1	Bomba de agua Xylem Rule il500P
6	3	Relé Moinkerin MY0086
7	3	Diodo BOJACK 10SQ050
8	3	Interruptor de Palanca RS PRO 734-7062

Tabla 15: Elementos de los circuitos de control. Fuente: elaboración propia.

Nota: a estos componentes hay que añadir diversos productos imprescindibles para que funcione el sistema, pero imposibles de describir con exactitud ya que dependen del vehículo en el que se instalen, como cables, conectores o cajas donde introducir los componentes. Estos productos se van a cifrar en 50€ para el sistema eléctrico.

Al igual que para el circuito de combustible, los componentes sugeridos en la tabla anterior se encuentran más desarrollados en la tabla 46 del Anexo I junto con las webs donde se encuentran disponibles.

FUNCIONAMIENTO

El arranque se realiza en la posición mostrada en las figuras anteriores, con el motor alimentado por Diesel exclusivamente. Cuando la aguja del indicador de temperatura del motor marca por encima del mínimo se acciona el interruptor del circuito de la figura 6 y la bomba de agua comienza a calentar la mezcla de Diesel y aceite de girasol. Cuando el motor alcanza la temperatura de funcionamiento se acciona el interruptor del circuito de la figura 4. Esto apaga la bomba de Diesel, enciende la bomba de la mezcla y cambia la posición de la válvula para alimentar al motor con la mezcla. Esta operación debe hacer al ralentí o sin acelerar para evitar privar al motor de combustible. A continuación, unos segundos después se acciona el interruptor del circuito de la figura 5 para cambiar de posición la válvula de 3 vías en el retorno para devolver el combustible sobrante a su tanque correcto. El tiempo que se debe esperar varía entre motores y debe ser medido después de la instalación de las modificaciones. Ahora el motor está funcionando con la mezcla del segundo depósito. Cuando se desee parar el motor, es necesario devolver los interruptores de los circuitos de las figuras 4 y 6 a sus posiciones iniciales un minuto antes de la parada. A continuación, al igual que antes, hay que esperar el mismo tiempo antes de accionar el interruptor del otro circuito. Ahora el motor está de nuevo usando Diesel y el sistema de inyección está lleno de él y el motor se puede apagar y el próximo arranque será con Diesel.

PROPIEDADES DE MEZCLA ACEITE-DIESEL

Los parámetros más importantes a tener en cuenta para hacer funcionar de manera segura un sistema de inyección con un combustible para el que no fue diseñado son la densidad y la viscosidad. Otros parámetros para tener en cuenta son la lubricidad, la corrosión, el poder calorífico, el dosado estequiométrico y el número de cetano.

DENSIDAD

La densidad del combustible tiene menos relevancia en sistemas de inyección. Pese a que la inyección trabaja de manera volumétrica, gracias al ordenador de control del motor, que es capaz de ajustar la mezcla según datos que le llegan desde multitud de sensores, la variación de densidad se corrige con los periodos de inyección. Un cambio leve de densidad no tiene un efecto pronunciado en la combustión o las prestaciones del motor. Si el motor precisa un volumen mayor de combustible para entregar el par requerido, el ordenador aumenta el periodo de inyección y la presión del rail. En la tabla 16 se muestra la variación de la densidad de los combustibles que se estudian dependiendo de la temperatura.

Temperatura (°C)	Densidad (g/cm ³)					
	Diesel	Aceite de Girasol Bruto	Aceite de Girasol Usado	Biodiesel	Biodiesel de Aceite de Girasol Bruto	Biodiesel de Aceite de Girasol Usado
10	0,838	0,925	0,926	0,886	0,889	0,892
20	0,831	0,917	0,919	0,880	0,882	0,885
30	0,824	0,911	0,912	0,872	0,874	0,877
40	0,818	0,904	0,905	0,864	0,867	0,870
50	0,811	0,899	0,898	0,858	0,859	0,863
60	0,804	0,893	0,892	0,851	0,852	0,855
70	0,797	0,888	0,885	0,843	0,845	0,848
80	0,789	0,880	0,878	0,837	0,837	0,840
90	0,783	0,874	0,871	0,829	0,830	0,833
100	0,776	0,867		0,823		
110	0,771	0,860		0,815		
120	0,764	0,854		0,808		
130	0,758	0,847		0,800		
140	0,752	0,841		0,791		

Tabla 16: Densidad de los combustibles a estudiar con relación a la temperatura. Fuente: elaboración propia.

En la figura 8 se aprecia como la densidad se reduce con forme aumenta la temperatura, pero la diferencia entre las densidades se mantiene prácticamente constante.

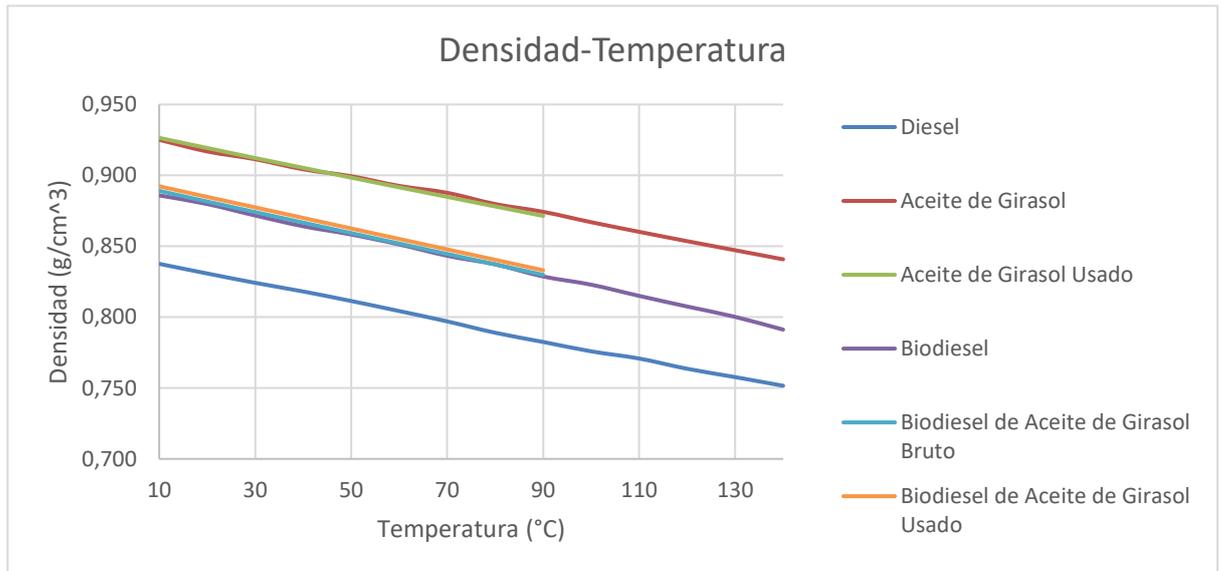


Figura 8: Variación de la densidad de los componentes frente a la temperatura. Fuente: elaboración propia.

VISCOSIDAD

La viscosidad, sin embargo, es muy relevante para el correcto funcionamiento de los componentes del sistema de inyección. Además, al contrario que la densidad, la diferencia entre los valores del Diesel y del aceite son muy elevados, especialmente a bajas temperaturas. Es por este motivo que es imprescindible calentar la mezcla antes de alimentar el sistema de inyección. En la tabla 17 se muestra la variación de viscosidad cinemática respecto a la temperatura de los combustibles a estudiar.

Temperatura (°C)	Viscosidad (mm ² /s)					
	Diesel	Aceite de Girasol Bruto	Aceite de Girasol Usado	Biodiesel	Biodiesel de Aceite de Girasol Bruto	Biodiesel de Aceite de Girasol Usado
10	5,39	118,72		9,00		
20	4,15	73,45		6,78		
30	3,30	48,46	51,08	5,30	6,15	6,29
40	2,70	33,78	35,53	4,26	4,87	5,05
50	2,26	24,48	25,83	3,51	3,98	4,08
60	1,92	18,52	19,46	2,94	3,33	3,40
70	1,64	14,44	15,17	2,51	2,83	2,88
80	1,43	11,53	12,10	2,16	2,40	2,48
90	1,27	9,44	9,88	1,90	2,01	2,12
100	1,14	7,78	8,22	1,69	1,69	1,85
110	1,03	6,50		1,51		
120	0,93	5,62		1,36		
130	0,85	4,91		1,23		
140	0,78	4,37		1,13		

Tabla 17: Viscosidad de los combustibles a estudiar con relación a la temperatura. Fuente: elaboración propia.

La figura 9 muestra una gráfica con la viscosidad cinemática de los combustibles. De interés es la gran diferencia que existe a bajas temperaturas y la bajada brusca de viscosidad que tienen los aceites de girasol a medida que se calientan, lo que hace posible que, con calentarlo, se asemeje considerablemente a la viscosidad del Diesel. El Biodiesel tiene una viscosidad superior al Diesel, pero al ser suficientemente reducida, no sería necesario calentar una mezcla entre Diesel y Biodiesel. Incluso, excepto que la temperatura del combustible en el tanque fuese extremadamente baja, el Biodiesel se podría emplear como único combustible.

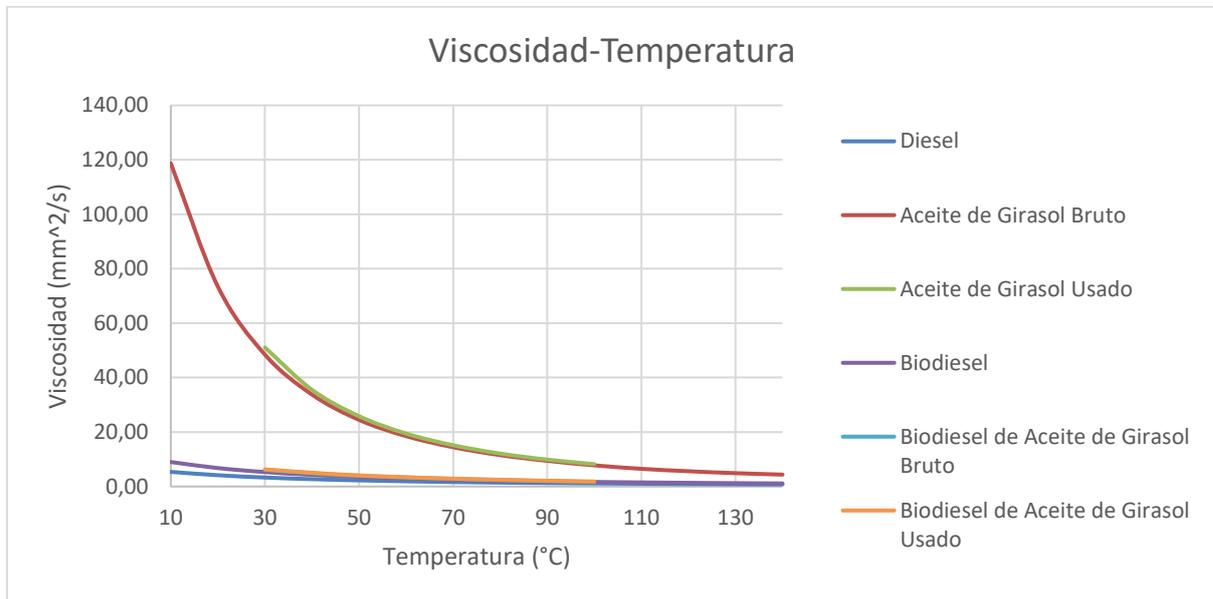


Figura 9: Variación de la viscosidad cinemática de los componentes frente a la temperatura. Fuente: elaboración propia.

LUBRICIDAD

Como discutido anteriormente, el proceso de desulfurización del gasóleo provoca una reducción importante de las propiedades lubricantes del combustible. En la actualidad, para recuperar estas propiedades, se mezcla en gasóleo con Biodiesel en un 7% y se añaden aditivos específicos. Al realizar una mezcla de Diesel y aceite de girasol, las propiedades lubricantes del combustible aumentarán. Aunque la lubricidad y la viscosidad son propiedades distintas, tienen una fuerte relación. La mayor viscosidad del aceite vegetal indica que tendrá un efecto lubricante mayor que el Diesel y que por lo tanto de la mezcla de ambos resultará un combustible con mejor lubricidad.

CORROSIÓN

La corrosión de un combustible es un parámetro muy relevante debido al prolongado contacto que tiene con los elementos del sistema de inyección. Estos elementos están

fabricados casi en su totalidad de metales y es imprescindible que funcionen durante muchos años y kilómetros sin averías. La corrosión que provocan los combustibles se cuantifica en los productos petrolíferos con el ensayo de la lámina de cobre según normativa UNE-EN ISO 2160. En este ensayo, todos los combustibles que se pretenden emplear en este proyecto han obtenido la calidad 1a y al no suponer un aumento de la acción corrosiva comparado con el gasóleo, las mezclas se pueden determinar sin que este sea un factor limitante.

PCI

El PCI, poder calorífico inferior mide la energía expulsada durante la combustión. Las mezclas que se pretenden hacer van a tener un poder calorífico menor que el gasóleo exclusivamente, porque tanto el aceite de girasol como el Biodiesel tienen un poder calorífico menor. Esta reducción va a provocar que un vehículo funcionando con las mezclas tendrá un consumo de combustible mayor que usando solo Diesel. Sin embargo, la reducción del poder calorífico no tendrá un efecto importante en las prestaciones del motor. Los motores Diesel funcionan variando el dosado para ajustarse a la entrega de potencia requerida en cada momento. Al tener un PCI menor, las mezclas necesitarán más cantidad inyectada para conseguir desarrollar la misma cantidad de potencia. El ordenador de control del motor se encargará de ajustar el momento y la duración del periodo de inyección para entregar la potencia requerida. Además, gracias a los sensores que utiliza, es capaz de ajustar la mezcla de aire y combustible para que las emisiones, especialmente de óxidos de nitrógeno sigan siendo lo más bajas posibles.

DOSADO ESTEQUIOMÉTRICO

Los motores Diesel funcionan con una mezcla de aire combustible más pobre en comparación con la estequiométrica. Es debido a esto que los problemas medioambientales relacionados con los motores Diesel son por emisiones de óxidos de nitrógeno, por la presencia de oxígeno sobrante durante la combustión a alta temperatura. A continuación, se

va a calcular el dosado del Diesel y del aceite de girasol. Mediante la fórmula química del Diesel y las fórmulas y proporciones de los ácidos grasos del aceite se calcula el oxígeno que requiere la quema de un mol de combustible. Sabiendo que la atmósfera está compuesta de un 21% de oxígeno y con las masas molares de los combustibles y del oxígeno se obtiene la proporción de aire que se necesita en función del combustible.

$$2 * C + 0,5 * H - O = O_{Nec}$$

$$m_{Aire} = \frac{O_{Nec} * M_O}{0,21}$$

$$AFR = \frac{m_{Aire}}{M_C}$$

Donde C es la cantidad de átomos de carbono por mol, H es la cantidad de átomos de H por mol, O es la cantidad de átomos de oxígeno en el combustible por mol, O_{Nec} es la cantidad de átomos de oxígeno necesarios del ambiente, m_{Aire} es la masa de aire necesaria por mol de combustible y AFR es la relación aire-combustible (Air-Fuel-Ratio en inglés).

	Diesel	Aceite bruto	Aceite usado
Fórmula	$C_{10,8}H_{18,7}$	$C_{17,9}H_{32,8}O_2$	$C_{17,9}H_{33,0}O_2$
AFR	15,872	13,663	13,688

Tabla 18: Fórmula química y AFR del Diesel y aceites. Fuente: elaboración propia.

NÚMERO DE CETANO

El número del gasóleo indica la facilidad para detonar ese combustible como el retraso entre la inyección y la combustión. A mayor número de cetano, menor tiempo de retraso de la combustión y mayor suavidad en el funcionamiento. En los motores Diesel, que no utilizan bujías para prender el combustible, sino el calor producido durante la compresión, cuanto mayor sea la capacidad de autoencendido, más fácil resulta el arranque en frío y con mayor suavidad funcionará el motor. En la tabla 19 se muestran los números de cetano de los combustibles.

	Diesel	Aceite	Biodiesel
Número de Cetano	51	37	51

Tabla 19: Números de cetano de los combustibles. Fuente: elaboración propia.

Principalmente debido a la viscosidad, pero parcialmente debido al mayor número de cetano del aceite, los arranques se realizan con Diesel exclusivamente y la mezcla junto con el motor se calientan en los primeros minutos de funcionamiento, antes de cambiar el combustible a la mezcla.

DETERMINACIÓN DE LA MEZCLA DIESEL-ACEITE

Para la determinación de la mezcla, el parámetro restrictivo será la viscosidad, ya que a medida que se añade aceite de girasol a la mezcla, la viscosidad aumenta y el sistema de inyección no puede operar de manera segura y prolongada con una viscosidad demasiado elevada. De modo que la viscosidad será el parámetro para determinar primero y los demás serán consecuencia de este.

No se dispone de los datos relativos a los límites de funcionamiento, especialmente la viscosidad máxima del combustible para el sistema de inyección. Estos datos son secretos de cada empresa y no están disponibles para el público. Un vehículo con motor Diesel debe poder funcionar en el invierno sin que la viscosidad del gasoil a baja temperatura suponga un problema, desgaste o deterioro del sistema de inyección. En los arranques en invierno, la temperatura del combustible almacenado en el tanque puede encontrarse muy por debajo de 0°C. Como medida de seguridad para evitar posible averías o errores en el cálculo, se empleará la viscosidad del gasoil a 10°C como la viscosidad máxima que tendrá la mezcla de aceite de girasol y Diesel en el momento de alimentar el sistema de inyección. La tabla 20 muestra los valores de viscosidad del Diesel a 10°C.

Diesel	
Temperatura (°C)	10
Densidad (kg/m ³)	837,6
Viscosidad cinemática (m ² /s)	5,39E-06
Viscosidad dinámica (kg/(m*s))	4,51E-03

Tabla 20: Parámetros del Diesel a 10°C. Fuente: elaboración propia.

Para el cálculo de la viscosidad de la mezcla se van a emplear la ecuación de Kendall y Monroe y la ecuación de Arrhenius y se supone que la mezcla es ideal. Esto significa que al mezclar los componentes no hay un cambio en su volumen.

Ecuación de Kendall y Monroe:

$$\mu_m^{\frac{1}{3}} = x_1 * \mu_1^{\frac{1}{3}} + x_2 * \mu_2^{\frac{1}{3}}$$

Ecuación de Arrhenius:

$$\ln(\mu_m) = x_1 * \ln(\mu_1) + x_2 * \ln(\mu_2)$$

Donde μ_m es la viscosidad dinámica de la mezcla, μ_1 y μ_2 son las viscosidades dinámicas de los componentes de la mezcla y x_1 y x_2 son las fracciones molares de los componentes.

Se emplean ambas ecuaciones al no existir un único modelo que rijan la viscosidad de las mezclas y se utilizará el valor más restrictivo para diseñar la mezcla óptima.

La temperatura de funcionamiento de los motores varía ligeramente entre modelos, generalmente entre los 85°C y 90°C y dependiendo del caudal de combustible que alimenta el motor y la eficiencia del intercambiador de calor que calentará la mezcla antes de ser inyectada en el motor, el sistema será capaz de calentar la mezcla hasta una temperatura determinada, pero distinta para cada sistema. Es por esto por lo que se calcula la viscosidad para varios valores de temperatura. El propósito de este método es que, una vez realizada la instalación del sistema de alimentación de combustible, se mida la temperatura con el sensor que el ordenador de control ya tiene incorporado y se ajuste la mezcla de gasoil y aceite a la más adecuada para las condiciones de cada motor y los componentes seleccionados para las modificaciones realizadas. Cuanto mayor es la temperatura a la que el intercambiador de calor es capaz de calentar la mezcla, menor es su viscosidad y por lo tanto mayor puede ser la fracción de aceite de girasol en ella. Para poder cubrir el rango de temperaturas a las que las distintas combinaciones de componentes y motores calientan el combustible, se calcula la mezcla más adecuada para diferentes temperaturas entre 65°C y 80°C en incrementos de 5°C.

Para el cálculo de la viscosidad de una mezcla de líquidos es necesario conocer su masa molecular. El aceite de girasol está compuesto de diversos ácidos grasos y la mezcla de estos varía también si es bruto o usado. La información relevante de los ácidos grasos de ambos aceites está recogida en la tabla 34 al final de este apartado. Para obtener la masa molar de un aceite vegetal, calculamos la masa molar de cada uno de los ácidos grasos que lo componen. Esta se calcula, conociendo la fórmula química, como la suma de los pesos atómicos de los átomos que componen cada ácido graso. La masa molar del aceite de girasol se obtiene como:

$$M_t = \frac{1}{\sum_i \frac{w_i}{M_i}}$$

Donde M_t es la masa molar total, M_i es la masa molar de cada ácido graso y w_i es la fracción másica de los ácidos grasos.

En la tabla 21 se muestran las masas molares del Diesel y los aceites de girasol que se desean mezclar.

	Diesel	Aceite de Girasol bruto	Aceite de Girasol usado
masa molar (g/mol)	148,57	279,92	279,90

Tabla 21: Masas molares del Diesel y los aceites de girasol. Fuente: elaboración propia.

Con la masa molar y las viscosidades de los componentes de la mezcla, se emplea la ecuación de Kendall y Monroe y la de Arrhenius para obtener las viscosidades de las diferentes mezclas y temperaturas. Estas ecuaciones calculan la viscosidad dinámica de una mezcla a partir de las viscosidades dinámicas de sus componentes, por lo que lo primero es obtener la viscosidad dinámica a partir de la cinemática para el aceite y el Diesel y en cada temperatura.

$$\mu = \nu * \rho$$

Donde μ es la viscosidad dinámica $\left[\frac{kg}{m*s}\right]$, ν es la viscosidad cinemática $\left[\frac{m^2}{s}\right]$ y ρ es la densidad $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$.

Temperatura (°C)	Densidad (kg/m ³)		
	Diesel	Aceite de Girasol	Aceite usado
65	800,65	890,15	888,23
70	797,00	887,70	884,86
75	793,00	883,75	881,48
80	789,00	879,80	878,10

Tabla 22: Densidad del Diesel y los aceites calentados. Fuente: elaboración propia.

Temperatura (°C)	Viscosidad cinemática (m ² /s)		
	Diesel	Aceite de Girasol	Aceite usado
65	1,78E-06	1,65E-05	1,73E-05
70	1,64E-06	1,44E-05	1,52E-05
75	1,54E-06	1,30E-05	1,36E-05
80	1,43E-06	1,15E-05	1,21E-05

Tabla 23: Viscosidad cinemática del Diesel y los aceites calentados. Fuente: elaboración propia.

Temperatura (°C)	Viscosidad dinámica(kg/(m*s))		
	Diesel	Aceite de Girasol	Aceite usado
65	1,43E-03	1,47E-02	1,54E-02
70	1,31E-03	1,28E-02	1,34E-02
75	1,22E-03	1,15E-02	1,20E-02
80	1,13E-03	1,01E-02	1,06E-02

Tabla 24: Viscosidad dinámica del Diesel y los aceites calentados. Fuente: elaboración propia.

Los datos para temperaturas que no se encuentran en las tablas 16 y se han calculado por interpolación lineal.

Las ecuaciones empleadas para obtener las mezclas son las siguientes.

Fracción molar:

$$x_D = \frac{\frac{w_D}{M_D}}{\frac{w_D}{M_D} + \frac{w_A}{M_A}}$$

$$x_A = \frac{\frac{w_A}{M_A}}{\frac{w_D}{M_D} + \frac{w_A}{M_A}}$$

Fórmula de rho:

$$\rho_m = \frac{1}{\frac{w_D}{\rho_D} + \frac{w_A}{\rho_A}}$$

Arrhenius:

$$\ln(\mu_m) = x_D * \ln(\mu_D) + x_A * \ln(\mu_A)$$

Kendall y Monroe:

$$\mu_m^{\frac{1}{3}} = x_D * \mu_D^{\frac{1}{3}} + x_A * \mu_A^{\frac{1}{3}}$$

$$v = \frac{\mu}{\rho}$$

Donde x es la fracción molar [], w es la fracción másica [], M es la masa molar $\left[\frac{g}{mol}\right]$, ρ es la densidad $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$, μ es la viscosidad dinámica $\left[\frac{kg}{m*s}\right]$, es la viscosidad cinemática $\left[\frac{mm^2}{s}\right]$, el subíndice D es para el Diesel y el subíndice es para el aceite de girasol.

Con estas ecuaciones y realizando un barrido de mezclas con intervalos del 10% en la fracción másica se obtienen las siguientes tablas para cada temperatura. En todas las combinaciones, la ecuación que devuelve un valor más alto y por lo tanto más restrictiva es la de Kendall y Monroe. Las primeras cuatro (tablas 25 a 28) son mezclas de aceite de girasol bruto y Diesel y las siguientes cuatro (tablas 29 a 32) son mezclas de aceite de girasol usado y Diesel. El intervalo donde el valor de la viscosidad aumenta por encima del límite se divide en intervalos de 1% para afinar más la mezcla a emplear.

Masa		Fracción molar			Arrhenius		Kendall y Monroe	
% de Diesel	% de aceite	Diesel	Aceite	ρ	μ	ν	μ	ν
100	0	1,000	0,000	800,65	1,43E-03	1,780	1,43E-03	1,780
90	10	0,944	0,056	808,78	1,62E-03	2,006	1,72E-03	2,131
80	20	0,883	0,117	817,08	1,87E-03	2,292	2,10E-03	2,568
70	30	0,815	0,185	825,55	2,20E-03	2,659	2,57E-03	3,118
60	40	0,739	0,261	834,20	2,62E-03	3,142	3,18E-03	3,816
50	50	0,653	0,347	843,03	3,20E-03	3,794	3,97E-03	4,714
49	51	0,644	0,356	843,92	3,27E-03	3,871	4,07E-03	4,817
48	52	0,635	0,365	844,82	3,34E-03	3,951	4,16E-03	4,923
47	53	0,626	0,374	845,72	3,41E-03	4,034	4,26E-03	5,032
46	54	0,616	0,384	846,62	3,49E-03	4,120	4,36E-03	5,144
45	55	0,607	0,393	847,52	3,57E-03	4,208	4,46E-03	5,259
44	56	0,597	0,403	848,42	3,65E-03	4,300	4,56E-03	5,378
43	57	0,587	0,413	849,33	3,73E-03	4,395	4,67E-03	5,499
42	58	0,577	0,423	850,23	3,82E-03	4,493	4,78E-03	5,624
41	59	0,567	0,433	851,14	3,91E-03	4,595	4,90E-03	5,753
40	60	0,557	0,443	852,05	4,01E-03	4,701	5,01E-03	5,885
30	70	0,447	0,553	861,27	5,18E-03	6,011	6,40E-03	7,437
20	80	0,320	0,680	870,68	6,95E-03	7,986	8,30E-03	9,529
10	90	0,173	0,827	880,31	9,80E-03	11,130	1,09E-02	12,412
0	100	0,000	1,000	890,15	1,47E-02	16,480	1,47E-02	16,480

Tabla 25: Mezcla Diesel-Aceite de Girasol Crudo a 65°C. Fuente: elaboración propia.

Masa		Fracción molar		ρ	Arrhenius		Kendall y Monroe	
% de Diesel	% de aceite	Diesel	Aceite		μ	ν	μ	ν
100	0	1,000	0,000	797,00	1,31E-03	1,640	1,31E-03	1,640
90	10	0,944	0,056	805,23	1,48E-03	1,843	1,57E-03	1,953
80	20	0,883	0,117	813,63	1,71E-03	2,099	1,90E-03	2,340
70	30	0,815	0,185	822,20	2,00E-03	2,427	2,32E-03	2,826
60	40	0,739	0,261	830,96	2,37E-03	2,857	2,86E-03	3,440
50	50	0,653	0,347	839,91	2,88E-03	3,434	3,55E-03	4,229
40	60	0,557	0,443	849,05	3,60E-03	4,235	4,46E-03	5,253
39	61	0,546	0,454	849,98	3,68E-03	4,332	4,57E-03	5,372
38	62	0,536	0,464	850,90	3,77E-03	4,432	4,67E-03	5,494
37	63	0,525	0,475	851,83	3,86E-03	4,536	4,79E-03	5,619
36	64	0,515	0,485	852,76	3,96E-03	4,643	4,90E-03	5,749
35	65	0,504	0,496	853,70	4,06E-03	4,755	5,02E-03	5,881
34	66	0,493	0,507	854,63	4,16E-03	4,872	5,14E-03	6,018
33	67	0,481	0,519	855,57	4,27E-03	4,993	5,27E-03	6,159
32	68	0,470	0,530	856,51	4,38E-03	5,118	5,40E-03	6,304
31	69	0,458	0,542	857,45	4,50E-03	5,249	5,53E-03	6,453
30	70	0,447	0,553	858,39	4,62E-03	5,385	5,67E-03	6,606
20	80	0,320	0,680	867,95	6,17E-03	7,110	7,31E-03	8,426
10	90	0,173	0,827	877,71	8,63E-03	9,837	9,59E-03	10,925
0	100	0,000	1,000	887,70	1,28E-02	14,440	1,28E-02	14,440

Tabla 26: Mezcla Diesel-Aceite de Girasol Crudo a 70°C. Fuente: elaboración propia.

Masa		Fracción molar			Arrhenius		Kendall y Monroe	
% de Diesel	% de aceite	Diesel	Aceite	ρ	μ	ν	μ	ν
100	0	1,000	0,000	793,00	1,22E-03	1,535	1,22E-03	1,535
90	10	0,944	0,056	801,23	1,38E-03	1,721	1,46E-03	1,819
80	20	0,883	0,117	809,63	1,58E-03	1,955	1,76E-03	2,171
70	30	0,815	0,185	818,21	1,84E-03	2,255	2,14E-03	2,611
60	40	0,739	0,261	826,97	2,19E-03	2,646	2,62E-03	3,165
50	50	0,653	0,347	835,92	2,65E-03	3,170	3,24E-03	3,875
40	60	0,557	0,443	845,07	3,29E-03	3,894	4,05E-03	4,795
39	61	0,546	0,454	845,99	3,37E-03	3,981	4,15E-03	4,901
38	62	0,536	0,464	846,92	3,45E-03	4,071	4,24E-03	5,011
37	63	0,525	0,475	847,85	3,53E-03	4,165	4,34E-03	5,123
36	64	0,515	0,485	848,78	3,62E-03	4,262	4,45E-03	5,239
35	65	0,504	0,496	849,72	3,71E-03	4,363	4,55E-03	5,358
34	66	0,493	0,507	850,65	3,80E-03	4,468	4,66E-03	5,480
33	67	0,481	0,519	851,59	3,90E-03	4,577	4,77E-03	5,606
32	68	0,470	0,530	852,53	4,00E-03	4,690	4,89E-03	5,736
31	69	0,458	0,542	853,47	4,10E-03	4,807	5,01E-03	5,869
30	70	0,447	0,553	854,42	4,21E-03	4,929	5,13E-03	6,007
20	80	0,320	0,680	863,98	5,59E-03	6,475	6,59E-03	7,632
10	90	0,173	0,827	873,75	7,78E-03	8,907	8,61E-03	9,859
0	100	0,000	1,000	883,75	1,15E-02	12,985	1,15E-02	12,985

Tabla 27: Mezcla Diesel-Aceite de Girasol Crudo a 75°C. Fuente: elaboración propia.

Masa		Fracción molar			Arrhenius		Kendall y Monroe	
% de Diesel	% de aceite	Diesel	Aceite	ρ	μ	ν	μ	ν
100	0	1,000	0,000	789,00	1,13E-03	1,430	1,13E-03	1,430
90	10	0,944	0,056	797,23	1,28E-03	1,599	1,34E-03	1,686
80	20	0,883	0,117	805,63	1,46E-03	1,811	1,61E-03	2,002
70	30	0,815	0,185	814,21	1,69E-03	2,082	1,95E-03	2,395
60	40	0,739	0,261	822,97	2,00E-03	2,434	2,38E-03	2,889
50	50	0,653	0,347	831,93	2,42E-03	2,904	2,93E-03	3,520
40	60	0,557	0,443	841,08	2,99E-03	3,551	3,65E-03	4,335
39	61	0,546	0,454	842,01	3,06E-03	3,629	3,73E-03	4,429
38	62	0,536	0,464	842,94	3,13E-03	3,709	3,81E-03	4,526
37	63	0,525	0,475	843,87	3,20E-03	3,792	3,90E-03	4,625
36	64	0,515	0,485	844,80	3,28E-03	3,879	3,99E-03	4,727
35	65	0,504	0,496	845,73	3,36E-03	3,969	4,09E-03	4,833
34	66	0,493	0,507	846,67	3,44E-03	4,062	4,18E-03	4,941
33	67	0,481	0,519	847,61	3,52E-03	4,158	4,28E-03	5,052
32	68	0,470	0,530	848,55	3,61E-03	4,259	4,38E-03	5,166
31	69	0,458	0,542	849,49	3,71E-03	4,363	4,49E-03	5,284
30	70	0,447	0,553	850,44	3,80E-03	4,472	4,60E-03	5,405
20	80	0,320	0,680	860,01	5,02E-03	5,839	5,88E-03	6,837
10	90	0,173	0,827	869,79	6,94E-03	7,974	7,65E-03	8,793
0	100	0,000	1,000	879,80	1,01E-02	11,530	1,01E-02	11,530

Tabla 28: Mezcla Diesel-Aceite de Girasol Crudo a 80°C. Fuente: elaboración propia.

Masa		Fracción molar			Arrhenius		Kendall y Monroe	
% de Diesel	% de aceite	Diesel	Aceite	ρ	μ	ν	μ	ν
100	0	1,000	0,000	800,65	1,43E-03	1,780	1,43E-03	1,780
90	10	0,944	0,056	808,62	1,63E-03	2,012	1,73E-03	2,143
80	20	0,883	0,117	816,76	1,88E-03	2,306	2,12E-03	2,597
70	30	0,815	0,185	825,06	2,21E-03	2,684	2,61E-03	3,169
60	40	0,739	0,261	833,52	2,65E-03	3,184	3,25E-03	3,899
50	50	0,653	0,347	842,17	3,25E-03	3,861	4,08E-03	4,840
49	51	0,644	0,356	843,04	3,32E-03	3,941	4,17E-03	4,949
48	52	0,635	0,365	843,92	3,40E-03	4,025	4,27E-03	5,060
47	53	0,626	0,374	844,80	3,47E-03	4,111	4,37E-03	5,175
46	54	0,616	0,384	845,68	3,55E-03	4,200	4,48E-03	5,293
45	55	0,607	0,393	846,56	3,63E-03	4,292	4,58E-03	5,414
44	56	0,597	0,403	847,44	3,72E-03	4,388	4,69E-03	5,538
43	57	0,587	0,413	848,33	3,81E-03	4,487	4,81E-03	5,666
42	58	0,577	0,423	849,22	3,90E-03	4,590	4,92E-03	5,798
41	59	0,567	0,433	850,10	3,99E-03	4,696	5,04E-03	5,933
40	60	0,557	0,443	851,00	4,09E-03	4,807	5,17E-03	6,072
30	70	0,447	0,553	860,01	5,31E-03	6,179	6,63E-03	7,709
20	80	0,320	0,680	869,21	7,18E-03	8,261	8,63E-03	9,925
10	90	0,173	0,827	878,62	1,02E-02	11,597	1,14E-02	12,985
0	100	0,000	1,000	888,23	1,54E-02	17,316	1,54E-02	17,316

Tabla 29: Mezcla Diesel-Aceite de Girasol Usado a 65°C. Fuente: elaboración propia.

Masa		Fracción molar		ρ	Arrhenius		Kendall y Monroe	
% de Diesel	% de aceite	Diesel	Aceite		μ	ν	μ	ν
100	0	1,000	0,000	797,00	1,31E-03	1,640	1,31E-03	1,640
90	10	0,944	0,056	804,99	1,49E-03	1,849	1,58E-03	1,963
80	20	0,883	0,117	813,15	1,72E-03	2,112	1,92E-03	2,366
70	30	0,815	0,185	821,47	2,01E-03	2,450	2,36E-03	2,872
60	40	0,739	0,261	829,96	2,40E-03	2,895	2,92E-03	3,514
50	50	0,653	0,347	838,64	2,93E-03	3,495	3,64E-03	4,341
49	51	0,644	0,356	839,51	2,99E-03	3,566	3,72E-03	4,436
48	52	0,635	0,365	840,39	3,06E-03	3,640	3,81E-03	4,534
47	53	0,626	0,374	841,27	3,13E-03	3,716	3,90E-03	4,634
46	54	0,616	0,384	842,15	3,20E-03	3,795	3,99E-03	4,737
45	55	0,607	0,393	843,04	3,27E-03	3,877	4,08E-03	4,843
44	56	0,597	0,403	843,93	3,34E-03	3,961	4,18E-03	4,952
43	57	0,587	0,413	844,81	3,42E-03	4,049	4,28E-03	5,064
42	58	0,577	0,423	845,70	3,50E-03	4,139	4,38E-03	5,179
41	59	0,567	0,433	846,60	3,58E-03	4,233	4,48E-03	5,297
40	60	0,557	0,443	847,49	3,67E-03	4,331	4,59E-03	5,419
30	70	0,447	0,553	856,53	4,74E-03	5,536	5,86E-03	6,847
20	80	0,320	0,680	865,77	6,37E-03	7,355	7,60E-03	8,773
10	90	0,173	0,827	875,21	8,97E-03	10,249	1,00E-02	11,427
0	100	0,000	1,000	884,86	1,34E-02	15,171	1,34E-02	15,171

Tabla 30: Mezcla Diesel-Aceite de Girasol Usado a 70°C. Fuente: elaboración propia.

Masa		Fracción molar		ρ	Arrhenius		Kendall y Monroe	
% de Diesel	% de aceite	Diesel	Aceite		μ	ν	μ	ν
100	0	1,000	0,000	793,00	1,22E-03	1,535	1,22E-03	1,535
90	10	0,944	0,056	801,04	1,38E-03	1,726	1,47E-03	1,829
80	20	0,883	0,117	809,25	1,59E-03	1,967	1,78E-03	2,194
70	30	0,815	0,185	817,62	1,86E-03	2,276	2,17E-03	2,652
60	40	0,739	0,261	826,17	2,21E-03	2,680	2,67E-03	3,232
50	50	0,653	0,347	834,90	2,69E-03	3,225	3,32E-03	3,976
40	60	0,557	0,443	843,82	3,36E-03	3,980	4,17E-03	4,943
39	61	0,546	0,454	844,72	3,44E-03	4,071	4,27E-03	5,055
38	62	0,536	0,464	845,63	3,52E-03	4,166	4,37E-03	5,171
37	63	0,525	0,475	846,53	3,61E-03	4,264	4,48E-03	5,289
36	64	0,515	0,485	847,44	3,70E-03	4,366	4,59E-03	5,411
35	65	0,504	0,496	848,35	3,79E-03	4,471	4,70E-03	5,537
34	66	0,493	0,507	849,26	3,89E-03	4,581	4,81E-03	5,666
33	67	0,481	0,519	850,18	3,99E-03	4,695	4,93E-03	5,799
32	68	0,470	0,530	851,09	4,10E-03	4,814	5,05E-03	5,936
31	69	0,458	0,542	852,01	4,21E-03	4,937	5,18E-03	6,077
30	70	0,447	0,553	852,93	4,32E-03	5,066	5,31E-03	6,222
20	80	0,320	0,680	862,24	5,77E-03	6,695	6,85E-03	7,942
10	90	0,173	0,827	871,75	8,08E-03	9,274	8,98E-03	10,306
0	100	0,000	1,000	881,48	1,20E-02	13,633	1,20E-02	13,633

Tabla 31: Mezcla Diesel-Aceite de Girasol Usado a 75°C. Fuente: elaboración propia.

Masa		Fracción molar		ρ	Arrhenius		Kendall y Monroe	
% de Diesel	% de aceite	Diesel	Aceite		μ	ν	μ	ν
100	0	1,000	0,000	789,00	1,13E-03	1,430	1,13E-03	1,430
90	10	0,944	0,056	797,09	1,28E-03	1,604	1,35E-03	1,695
80	20	0,883	0,117	805,34	1,47E-03	1,822	1,63E-03	2,023
70	30	0,815	0,185	813,77	1,71E-03	2,101	1,98E-03	2,432
60	40	0,739	0,261	822,38	2,03E-03	2,465	2,42E-03	2,948
50	50	0,653	0,347	831,17	2,45E-03	2,954	3,00E-03	3,609
40	60	0,557	0,443	840,15	3,05E-03	3,628	3,75E-03	4,466
39	61	0,546	0,454	841,06	3,12E-03	3,709	3,84E-03	4,565
38	62	0,536	0,464	841,97	3,19E-03	3,793	3,93E-03	4,667
37	63	0,525	0,475	842,88	3,27E-03	3,881	4,02E-03	4,772
36	64	0,515	0,485	843,80	3,35E-03	3,971	4,12E-03	4,880
35	65	0,504	0,496	844,71	3,43E-03	4,065	4,22E-03	4,990
34	66	0,493	0,507	845,63	3,52E-03	4,163	4,32E-03	5,104
33	67	0,481	0,519	846,55	3,61E-03	4,264	4,42E-03	5,222
32	68	0,470	0,530	847,47	3,70E-03	4,369	4,53E-03	5,343
31	69	0,458	0,542	848,40	3,80E-03	4,479	4,64E-03	5,467
30	70	0,447	0,553	849,33	3,90E-03	4,593	4,75E-03	5,595
20	80	0,320	0,680	858,71	5,18E-03	6,033	6,10E-03	7,109
10	90	0,173	0,827	868,29	7,20E-03	8,297	7,97E-03	9,183
0	100	0,000	1,000	878,10	1,06E-02	12,095	1,06E-02	12,095

Tabla 32: Mezcla Diesel-Aceite de Girasol Usado a 80°C. Fuente: elaboración propia.

Como se aprecia en las figuras 11 y 12, a medida que aumenta la temperatura del combustible, mayor es la proporción de aceite de girasol que se puede emplear. Al utilizar aceite de girasol usado en comparación con aceite bruto, la proporción debe ser ligeramente menor, ya que su viscosidad es mayor.

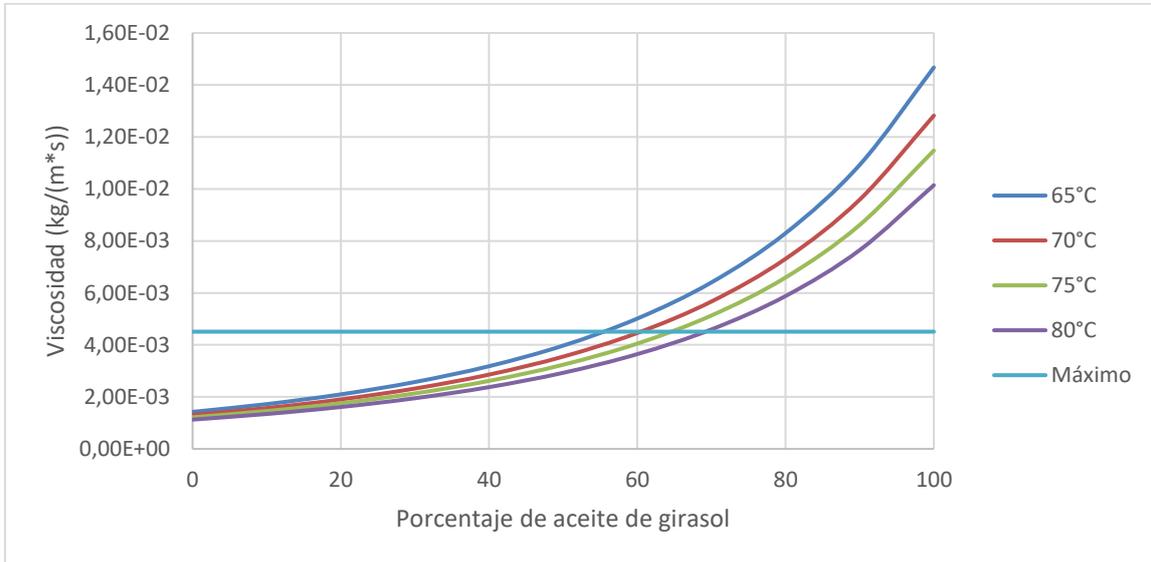


Figura 10: Viscosidad de la mezcla Diesel-aceite de girasol bruto para distintas temperaturas. Fuente: elaboración propia.

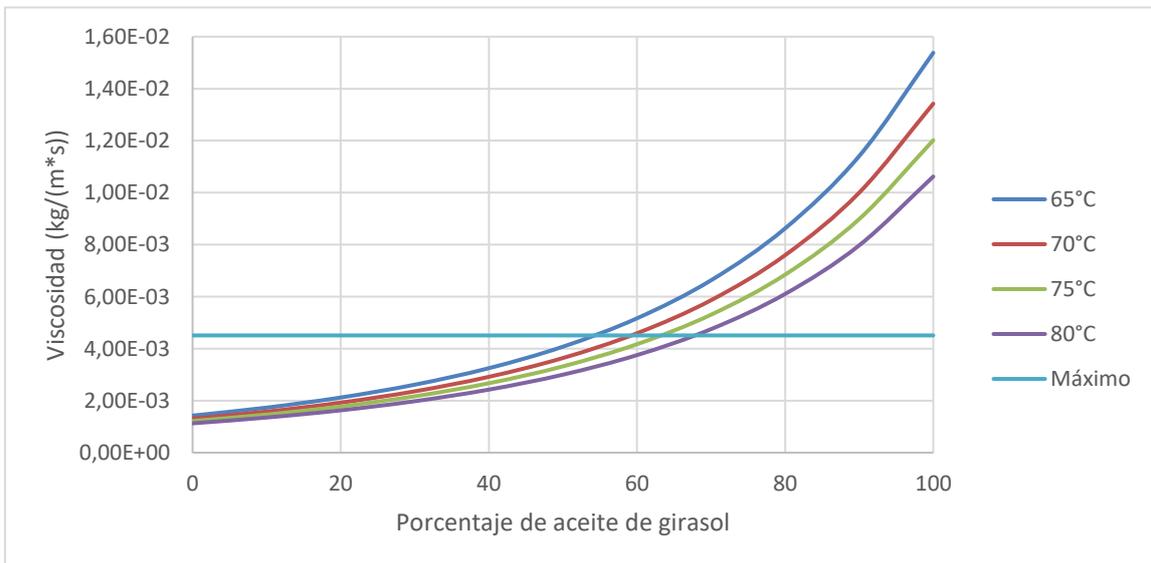


Figura 11: Viscosidad de la mezcla Diesel-aceite de girasol usado para distintas temperaturas. Fuente: elaboración propia.

En la tabla 33 se muestra los porcentajes en masa de aceite máximos que se pueden utilizar en relación con la temperatura a la que se calienta la mezcla de Diesel y aceite de girasol.

	Diesel-Aceite bruto	Diesel-Aceite usado
Temperatura (°C)	% de Aceite	% de Aceite
65	55	54
70	60	59
75	64	63
80	69	67

Tabla 33: Máximos porcentajes de masa de aceite en función de la temperatura. Fuente: elaboración propia.

Número Lipídico	Composición de ácidos grasos											
	14:0	16:0	16:1	17:0	18:0	18:1	18:2	18:3	20:0	20:1	22:0	24:0
Nombre	Ácido mirístico	Ácido palmítico	Ácido palmitoleico	Ácido margárico	Ácido esteárico	Ácido elaídico	Ácido linoleico	Ácido alpha-linolénico	Ácido araquídico	Ácido eicosenoico	Ácido behénico	Ácido lignocérico
Fórmula	C ₁₄ H ₂₈ O ₂	C ₁₆ H ₃₂ O ₂	C ₁₆ H ₃₀ O ₂	C ₁₇ H ₃₄ O ₂	C ₁₈ H ₃₆ O ₂	C ₁₈ H ₃₄ O ₂	C ₁₈ H ₃₂ O ₂	C ₁₈ H ₃₀ O ₂	C ₂₀ H ₄₀ O ₂	C ₂₀ H ₃₈ O ₂	C ₂₂ H ₄₄ O ₂	C ₂₄ H ₄₈ O ₂
Masa Molar (g/mol)	228,37	256,42	254,41	270,45	280,44	282,46	280,44	278,43	310,51	312,53	340,58	368,63
Facción másica en aceite bruto(%)	0,06	6,28	0,11	0,04	3,51	25,81	62,57	0,1	0,3	0,22	0,72	0,28
Facción másica en aceite usado (%)	0,09	7,57	0,05	0,08	4,59	34,9	50,91	0,02	0,36	0,23	0,83	0,37

Tabla 34: Composición de ácidos grasos de los aceites de girasol bruto y usado. Fuente: elaboración propia.

En la figura 13 se muestra la variación de la proporción de aceite respecto a la temperatura. Es lógico que la temperatura del combustible no será exactamente una de las calculadas. De esta figura se puede obtener la proporción de aceite para cualquier temperatura comprendida entre 65°C y 80°C.

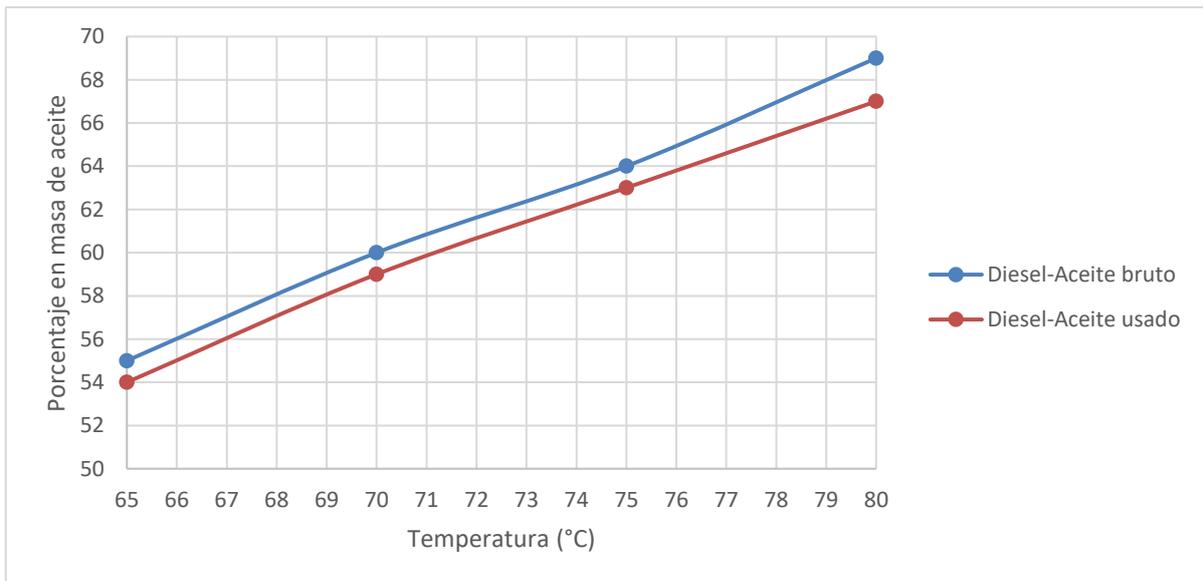


Figura 12: Porcentajes de aceite recomendados en relación con la temperatura. Fuente: elaboración propia.

Debido a la facilidad de medir el volumen de los líquidos frente a su masa, en la figura 14 se muestran las mismas mezclas que en la figura anterior, pero la proporción de aceite viene en función del volumen.

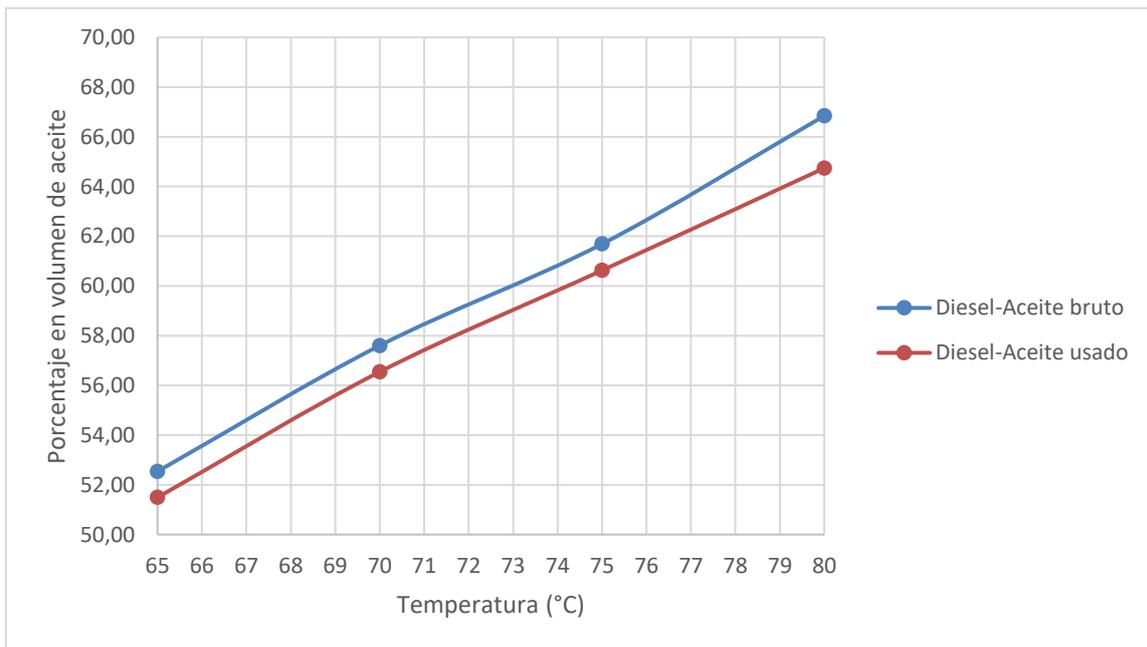


Figura 13: Porcentajes de aceite recomendados en relación con la temperatura. Fuente: elaboración propia.

EMISIONES

Las emisiones de las mezclas se presentan en la tabla 35 y 36, así como la comparación con las emisiones de CO₂ que supone la utilización de estas mezclas respecto a Diesel exclusivamente, que produce 163 gCO₂ eq. /km para el vehículo empleado en el estudio realizado por el Ciemat.

Temperatura (°C)	Diesel-Aceite bruto				
	% de Aceite	gCO ₂ eq. /kg	gCO ₂ eq./MJ	gCO ₂ eq. /km	Emisiones respecto Diesel (%)
65	55	2331,94	58,00	109,44	67,14
70	60	2215,75	55,31	104,38	64,04
75	64	2122,79	53,15	100,30	61,53
80	69	2006,60	50,43	95,17	58,38

Tabla 35: Emisiones de las mezclas Diesel-Aceite bruto. Fuente: elaboración propia.

Temperatura (°C)	Diesel-Aceite usado				
	% de Aceite	gCO ₂ eq. /kg	gCO ₂ eq./MJ	gCO ₂ eq. /km	Emisiones respecto Diesel (%)
65	54	1712,58	42,31	79,84	48,98
70	59	1536,88	38,09	71,88	44,10
75	63	1396,33	34,69	65,47	40,16
80	67	1255,78	31,28	59,03	36,21

Tabla 36: Emisiones de las mezclas Diesel-Aceite usado. Fuente: elaboración propia.

La utilización de las mezclas de Diesel y aceite de girasol reduce considerablemente las emisiones, al emitir entre 67% y 36% del CO₂ equivalente producido por la combustión de Diesel.

CONSUMO Y COSTES

Las mezclas tienen un poder calorífico inferior al Diesel, como se muestra en las tablas 37 y 38. Debido al PCI inferior de las mezclas, el consumo de combustible será mayor, entre un 103 y un 105 % del consumo de combustible al usar exclusivamente Diesel. Estos cálculos están realizados basados en la masa.

$$PCI_m = w_A * PCI_A + w_D * PCI_D$$

$$C_m = \frac{PCI_D}{PCI_m} * 100$$

Donde PCI es el poder calorífico inferior, w es la fracción másica y C_m es el consumo de la mezcla respecto al consumo de Diesel.

Diesel-Aceite bruto				
Temperatura (°C)	% de Aceite	PCI (MJ/kg)	PCI respecto Diesel (%)	Consumo respecto Diesel (%)
65	55	40,21	96,07	104,09
70	60	40,06	95,72	104,48
75	64	39,94	95,43	104,79
80	69	39,79	95,07	105,18

Tabla 37: PCI y consumo de las mezclas de aceite bruto. Fuente: elaboración propia.

Diesel-Aceite usado				
Temperatura (°C)	% de Aceite	PCI (MJ/kg)	PCI respecto Diesel (%)	Consumo respecto Diesel (%)
65	54	40,48	96,72	103,39
70	59	40,35	96,41	103,72
75	63	40,25	96,17	103,98
80	67	40,15	95,93	104,25

Tabla 38: PCI y consumo de las mezclas de aceite usado. Fuente: elaboración propia.

Operar el coche del estudio con Diesel supone un coste en combustible de 0,0697 €/km. El vehículo necesitará la misma cantidad de energía funcionando con Diesel o con la mezcla, por lo que el consumo de las mezclas se calcula a partir de la energía consumida por el Diesel.

$$E_D \left[\frac{MJ}{km} \right] = C_D \left[\frac{kg}{km} \right] * PCI_D \left[\frac{MJ}{kg} \right] = 1,887 \left[\frac{MJ}{km} \right]$$

$$C_m \left[\frac{kg}{km} \right] = \frac{E_D \left[\frac{MJ}{km} \right]}{PCI_m}$$

$$C_m \left[\frac{l}{km} \right] = \frac{C_m \left[\frac{kg}{km} \right]}{\rho \left[\frac{kg}{m^3} \right]} * 1000 \left[\frac{l}{m^3} \right]$$

$$P_m \left[\frac{€}{km} \right] = C_m \left[\frac{l}{km} \right] * (v_A * P_A + v_D * P_D)$$

Donde C son los consumos, P son los precios y v son las fracciones másicas.

En la tabla 39 se muestran los consumos y costes de operar ese coche con las mezclas propuestas. Todas ellas reducen ligeramente el coste del combustible, algo más cuando se trabaja con aceite usado.

Temperatura (°C)	Aceite bruto		Aceite usado	
	kg/km	€/km	kg/km	€/km
65	0,04693	0,06512	0,04662	0,06113
70	0,04711	0,06469	0,04677	0,06031
75	0,04725	0,06434	0,04689	0,05966
80	0,04743	0,06390	0,04700	0,05899

Tabla 39: Consumo y coste de uso de las mezclas. Fuente: elaboración propia.

El consumo de combustible de un vehículo se anuncia en litros consumidos cada 100 kilómetros recorridos. El consumo para el vehículo del estudio, un Ford Focus, es de 5,4 l/100km usando Diesel exclusivamente. En la tabla 40 se muestran los consumos con las mezclas propuestas para las distintas temperaturas.

Temperatura (°C)	Aceite bruto	Aceite usado
	l/100km	l/100km
65	5,334	5,304
70	5,328	5,295
75	5,322	5,287
80	5,316	5,279

Tabla 40: Consumos en l/100km del coche del estudio. Fuente: elaboración propia.

Pese a que el consumo en masa es mayor, como las mezclas tienen una densidad mayor, el consumo en litros cada 100 km usando las mezclas es inferior al consumo usando Diesel.

Un kit para modificar el sistema de combustible de dos tanques tiene un precio de 1500€ sin instalación. Los componentes del sistema diseñado tienen un precio total de aproximadamente 850 €. No se puede obtener este dato con precisión ya que cada vehículo y motor necesita unas modificaciones diferentes. Al contrario que el kit que se encuentra a la venta, el sistema diseñado no incluye control electrónico del sistema de combustible. Esto implica que el conductor del vehículo tendrá que estar pendiente de operar el sistema de combustible, mientras que el kit incluye un ordenador que controla la operación de las válvulas y bombas.

En la tabla 41 se muestra el número de litros que deben circular por cada sistema para que se recupere el precio de las modificaciones debido al menor coste del combustible. En este cálculo no se incluye el precio de la homologación o de la instalación.

Temperatura (°C)	Diesel-Aceite bruto		Diesel-Aceite usado	
	Punto de retorno (l)			
	Kit	Sistema Diseñado	Kit	Sistema Diseñado
65	21961	12445	11004	6235
70	20031	11351	10020	5678
75	18704	10599	9346	5296
80	17262	9782	8752	4960

Tabla 41: Litros de combustible hasta el retorno de la inversión. Fuente: elaboración propia.

Capítulo 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

El resultado más relevante de este proyecto son las emisiones de gases de efecto invernadero que producen los vehículos con estos motores, ya que el principal objetivo es la búsqueda de un combustible más respetuoso con el medio ambiente. En la tabla 42 se comparan las emisiones de los diferentes combustibles. Los resultados se representan en gramos de CO₂ equivalente por cada MJ de energía almacenada en el combustible.

Diesel	BD100A1	BD100A2	Diesel-Aceite bruto		Diesel-Aceite usado	
gCO ₂ eq./MJ	gCO ₂ eq./MJ	gCO ₂ eq./MJ	% de Aceite	gCO ₂ eq./MJ	% de Aceite	gCO ₂ eq./MJ
86,26	37,63	10,08	55	58,00	54	42,31
			60	55,31	59	38,09
			64	53,15	63	34,69
			69	50,43	67	31,28

Tabla 42: Emisiones de los combustibles y mezclas. Fuente: elaboración propia.

El uso de aceite de girasol, tanto bruto como usado previamente, reduce significativamente las emisiones de gases de efecto invernadero respecto al uso de Diesel exclusivamente. Sin embargo, las emisiones de estas mezclas son superiores a las provocadas por el Biodiesel, especialmente el producido con aceite usado.

Las emisiones de las mezclas serían menores si se aumenta la proporción de aceite de girasol. Para aumentar la proporción de las mezclas sería necesario aumentar la temperatura del combustible. Para conseguir temperaturas superiores a los 80°C ya no es posible calentar exclusivamente con el refrigerante del motor, es necesario añadir un calentador eléctrico al circuito de combustible. Otra opción es aumentar la viscosidad máxima para determinar las mezclas. En este estudio se ha empleado la viscosidad del Diesel a 10°C como viscosidad máxima. No obstante, el combustible en un vehículo en invierno puede bajar de esa temperatura, por lo que el sistema de inyección tiene que haber sido diseñado para soportar esa viscosidad sin que esto suponga un riesgo para el funcionamiento o una reducción de la vida útil de los componentes. Con estas consideraciones, la proporción de aceite en las

mezclas podría elevarse hasta constar de aceite exclusivamente. Empleando aceite de girasol como combustible, las emisiones son las menores de todas las alternativas, tanto comparado con Diesel como comparado con los Biodiesel.

Para poder emplear las mezclas sugeridas es necesario realizar algunas modificaciones a los vehículos, que supone un coste añadido. Si el vehículo se modificase con el kit disponible a la venta y este calentase la mezcla hasta 75°C, la inversión en las modificaciones se recuperaría después de usar más de 9000 litros de aceite de girasol usado. Por lo que sería necesario conducir durante entre 90000 y 170000 kilómetros para recuperar el dinero invertido en el kit, dependiendo del consumo del vehículo. A la vista de estos datos y teniendo en cuenta que el coste de la homologación y la instalación no están incluidos, no es económicamente rentable realizar estas modificaciones a vehículos. La opción más adecuada para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero relacionadas con el transporte es el Biodiesel. La utilización de este no requiere modificaciones imprescindibles al circuito de combustible y sus características son más similares al Diesel.

En otros países de Europa, Inglaterra, por ejemplo, se pueden emplear aceites vegetales usados como combustible y estos no están gravados por el impuesto a hidrocarburos, siempre que se use menos de una cierta cantidad. Gracias a esto, si uno dispone de aceite vegetal usado o lo puede adquirir por un precio reducido, el precio de este es muy inferior al usado para los cálculos en este proyecto, por lo que las modificaciones que requieren los vehículos son rentables antes. Es por esto por lo que en esos países hay vehículos que funcionan con aceites vegetales.

Si se dispone de una cantidad de aceite para su uso como combustible, como aceite bruto o como aceite usado, es una mejor decisión transformarlo en Biodiesel y usarlo como tal que usarlo como aceite directamente. Independientemente de la forma en la que se utilice, los biocombustibles conceden algo más de tiempo antes de que se agoten las reservas de combustibles fósiles de la Tierra. No son una solución, ya que su utilización sigue produciendo gases contaminantes, pero son una ayuda hacia la reducción de las emisiones. Mientras que otros tipos de vehículos no producen emisiones durante su uso, los vehículos

impulsados por biocombustibles siguen teniendo estas emisiones. Por lo que, aunque sus emisiones netas son muy reducidas, en los centros de las ciudades contaminadas, estos vehículos emiten contaminación igual que los que emplean exclusivamente combustibles fósiles. Además, pese a la reducción de emisiones de óxidos de nitrógeno de entorno al 14% dependiendo de la mezcla empleada como se muestra en la figura 2, el aumento de emisiones de hidrocarburos y óxidos de azufre sugiere evitar su uso en ciudades y reservarlo mejor para su uso en carretera

En cuanto a los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la ONU, este proyecto tiene una fuerte componente ecológica. El uso de aceite de girasol como combustible en motores Diesel provoca una reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y de óxidos de nitrógeno, que son el principal contaminante en motores Diesel. Los aceites vegetales son combustibles provenientes de fuentes totalmente renovables. Por estos motivos, este proyecto se alinea perfectamente con el objetivo de desarrollo sostenible de acción por el clima, el número 13. Si además se emplea aceite ya usado para cocinar, los beneficios para el clima aumentan fuertemente.

Este proyecto también toca ligeramente el objetivo número 7, energía asequible y no contaminante. Aunque no consigue cumplir completamente con este objetivo, el uso de aceite de girasol reduce el coste de uso de un vehículo al mismo tiempo que reduce la contaminación provocada por su uso. Especialmente en países que no disponen de recursos naturales de combustibles fósiles y los productos derivados del petróleo son más cotosos, si se dispone de una fuente de aceite vegetal a un precio bajo, el uso del aceite vegetal puede suponer una reducción considerable en el coste de combustible y una ayuda para los habitantes de países en vías de desarrollo.

Capítulo 7. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En este proyecto se ha llegado a la conclusión que el uso de aceite de girasol como combustible en motores Diesel Common-Rail es posible. La proporción de aceite debe variar según las condiciones, pero mientras se mantenga suficientemente baja para que la viscosidad no sea excesiva, no debería suponer un riesgo para los componentes del motor. Además de ser una opción viable, la quema de aceite de girasol en estos motores supone una reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero como se muestra en la tabla 43.

Diesel	BD100A1	BD100A2	Diesel-Aceite bruto		Diesel-Aceite usado	
gCO ₂ eq. /km	gCO ₂ eq. /km	gCO ₂ eq. /km	% de Aceite	gCO ₂ eq. /km	% de Aceite	gCO ₂ eq. /km
163,00	70,80	19,00	55	109,44	54	79,84
			60	104,38	59	71,88
			64	100,30	63	65,47
			69	95,17	67	59,03

Tabla 43: Emisiones de efecto invernadero de los combustibles. Fuente: elaboración propia.

El uso de estas mezclas también supone una bajada de algunas emisiones contaminantes, como los óxidos de nitrógeno. Sin embargo, también se ha concluido que las modificaciones necesarias para emplear aceite en estos motores no resultan económicamente rentables en la actualidad. Esto no significa que, si el precio del petróleo continúa aumentando lentamente en años venideros, estas modificaciones se vuelvan rentables y comunes en el futuro.

También se ha determinado que el uso de aceite vegetal como combustible, así como las modificaciones requeridas, son legales en España, pero conllevan gran cantidad de burocracia.

Como se puede observar en la tabla 43, las emisiones provocadas por el uso de las mezclas son considerablemente inferiores comparadas con el Diesel, pero, debido a que se puede emplear Biodiesel sin mezclar, las emisiones provocadas por el uso de Biodiesel son las menores de todos los combustibles.

En las condiciones actuales, es un mejor reparto de los recursos, destinar el aceite vegetal para uso como combustible a la producción de Biodiesel antes que a su uso como aceite directamente. No obstante, la producción de Biodiesel requiere de una fábrica que realice la transformación química, mientras que el aceite de girasol se puede emplear directamente tras ser exprimido o tras un pretratamiento, si se trata de aceite usado previamente. Este pretratamiento lo puede realizar el propietario del vehículo al carecer de complejidad y necesitar componentes básicos y de precio reducido. Biodiesel está disponible en un número muy reducido de gasolineras, por lo que hay muchas zonas en las que su uso es inviable actualmente.

Una ampliación de este estudio sería modificar un vehículo para medir la contaminación producida por las mezclas, así como usar instrumental para medir las propiedades como la viscosidad, que en este estudio se han obtenido mediante modelos.

La incorporación de un sistema electrónico que controle la alimentación de combustible sería una mejora interesante de las modificaciones diseñadas. Esto permitiría que el sistema funcionase de manera autónoma, sin la manipulación del conductor.

De cara al futuro, los biocombustibles puede que sean el eslabón entre los combustibles fósiles del pasado y la energía limpia del futuro. Al mezclar los biocombustibles con combustibles fósiles se puede lograr que las reservas mundiales de petróleo duren más tiempo, además de que el transporte provoque unas emisiones menores.

Capítulo 8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Payri, F., J. M. Desantes, “Motores de combustión interna alternativos”, Barcelona 2011.
- [2] Esteban, B., J. Riba, G. Baquero, A. Rius, R. Puig, “Temperature dependence of density and viscosity of vegetable oils”, *Biomass and Bioenergy* 42, páginas 164-171, Igualada 2012. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.03.007>
- [3] Bashir, O., F. Khalili, B. Sweileh, “Combustion and Emission Characteristics of Straight Vegetable Oil and Diesel Fuel Blends”, *Jordan Journal of Chemistry* Vol. 9 No.2, 2014, páginas 134-147, Jordan 2014.
https://www.researchgate.net/publication/312264033_Combustion_and_Emission_Characteristics_of_Straight_Vegetable_Oils_and_Diesel_Fuel_Blends
- [4] Blin, J., C. Brunschwig, A. Chapuis, O. Changotade, S. Sidibe, E. Noumi, P. Girard “CHARACTERISTICS OF VEGETABLE OILS FOR USE AS FUEL IN STATIONARY DIESEL ENGINES - TOWARDS SPECIFICATIONS FOR A STANDARD IN WEST AFRICA”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, 22, páginas 580-597.
https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00814899/file/CHARACTERISTICS_OF_VEGETABLE_OILS_FOR_USE_AS_FUEL_IN_STATIONARY_DIESEL_ENGINES_-_TOWARDS_SPECIFICATIONS_FOR_A_STANDARD_IN_WEST_AFRICA.pdf
- [5] Requena, J.F., A. Guimaraes, S. Quirós, E. Relea, S. Hernandez-Navarro, L.M. Navas Gracia, J. Martin-Gil, H. Fresneda Cuesta, “Life Cycle Assessment (LCA) of the Biofuel Production Process from Sunflower Oil, Rapeseed Oil and Soybean Oil”, *Fuel Processing Technology*, 92, páginas 190-199, 2010.
https://www.researchgate.net/publication/256497478_Life_Cycle_Assessment_LCA_of_the_Biofuel_Production_Process_from_Sunflower_Oil_Rapeseed_Oil_and_Soybean_Oil
- [6] Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT), “Análisis de Ciclo de Vida de Combustibles alternativos para el Transporte”, Fase II. Análisis de Ciclo de Vida Comparativo del Biodiésel y del Diésel, 2006.
- [7] Asociación Española de Normalización, UNE-EN 590:2014+A1, “Combustibles para automoción – Combustibles para motor diésel (gasóleo) – Requisitos y métodos de ensayo”, Madrid, 2017.

- [8] Asociación Española de Normalización, UNE-EN 14214:2013 V2+A2, “Productos petrolíferos líquidos – Ésteres metílicos de ácido grasos (FAME) para motores diésel y equipos de calefacción – Requisitos y métodos de ensayo”, Madrid, 2019.
- [9] Ley 38/1992, de 28 de diciembre, de Impuestos Especiales, Jefatura del Estado, «BOE» núm. 312, de 29 de diciembre de 1992 Referencia: BOE-A-1992-28741.
<https://www.boe.es/buscar/pdf/1992/BOE-A-1992-28741-consolidado.pdf>
- [10] Agencia Tributaria, Modelo 500-503, Tabla de Códigos de Biocombustibles.
https://www.agenciatributaria.es/static_files/AEAT/Aduanas/Contenidos_Privados/Impuestos_especiales/Presentacion_de_documentos_de_circulacion_Modelos_500_503_y_Notas_de_entrega/Codigos_bio.pdf
- [11] Ministerio de Economía, Industria y Competitividad, “Manual de Reformas de Vehículos”, revisión 4ª, 2018.
<https://www.veiasa.es/sites/default/files/archivos/Manual%20de%20Reformas%20de%20Veh%C3%ADculos%20Rev.%204.pdf>
- [12] Eryilmaz, T., M. Yesilyurt, “Comparative analysis of fuel properties of Biodiesels derived from sunflower oil, waste sunflower oil and neutralized waste sunflower oil”, Fresenius Environmental Bulletin, volumen 24. Páginas 3197-3204, 2015
https://www.researchgate.net/publication/292551615_Comparative_analysis_of_fuel_properties_of_Biodiesels_derived_from_sunflower_oil_waste_sunflower_oil_and_neutralized_waste_sunflower_oil
- [13] Mohammadshirazi, A., A. Akram, S. Rafiee, E. Kalhor, “Energy and cost analyses of biodiesel production from waste cooking oil”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 33, páginas 44–49, 2014.
https://www.researchgate.net/publication/260296131_Energy_and_cost_analyses_of_biodiesel_production_from_waste_cooking_oil
- [14] Zhmud, B., “Viscosity Blending Equations”. Lube: The European Lubricants Industry Magazine, número 121, páginas 24-29, Stockholm, 2014.
https://www.researchgate.net/publication/264052709_Viscosity_Blending_Equations
- [15] Corsini, A., R. di Antonio, G. di Nucci, A. Marchegiani, F. Rispoli, P. Venturini, “Performance Analysis of a Common-rail Diesel Engine Fuelled with Different Blends of Waste Cooking oil and Gasoil”, Energy Procedia, 101, páginas 606-613, 2016.
https://www.researchgate.net/publication/311978353_Performance_Analysis_of_a_Comm

on-

rail Diesel Engine Fuelled with Different Blends of Waste Cooking oil and Gasoil

ANEXO I

Foto	Descripción	Enlace	Precio
	Tamiz 1mm	https://www.amazon.es/Schneider-GT107-harina-tamiz-malla-1-mm/dp/B076M5ZHRK/ref=sr_1_1?_mk_es_ES=%C3%85M%C3%85C5%BD%C3%95%C3%91&dchild=1&keywords=tamiz+1mm&qid=1618240338&sr=8-1	18,33
	Filtro de calcetín 100 micras	https://www.amazon.es/Bolsas-filtro-filtro-mic%C3%B3n-micras/dp/B07V677H8N/ref=sr_1_1?_mk_es_ES=%C3%85M%C3%85C5%BD%C3%95%C3%91&dchild=1&keywords=filtro%2Bcalcet%C3%91n%2B1%2Bmicra&qid=1618240671&sr=8-1&th=1	10,56
	Filtro de calcetín 10 micras	https://www.amazon.es/Bolsas-filtro-filtro-mic%C3%B3n-micras/dp/B07V52W17X/ref=sr_1_1?_mk_es_ES=%C3%85M%C3%85C5%BD%C3%95%C3%91&dchild=1&keywords=filtro%2Bcalcet%C3%91n%2B1%2Bmicra&qid=1618240671&sr=8-1&th=1	10,56
	Filtro de calcetín 1 micras	https://www.amazon.es/Bolsas-filtro-filtro-mic%C3%B3n-micras/dp/B07V78LZF5/ref=sr_1_1?_mk_es_ES=%C3%85M%C3%85C5%BD%C3%95%C3%91&dchild=1&keywords=filtro%2Bcalcet%C3%91n%2B1%2Bmicra&qid=1618240671&sr=8-1&th=1	11,15

Tabla 44: Productos sugeridos para el pretratamiento de aceite usado. Fuente: elaboración propia.

Foto	Descripción	Enlace	Precio
	Bomba de Combustible BOSCH 0 580 464 084	https://www.autodoc.es/bosch/1156490	94,71
	Tanque de combustible extra-rueda de repuesto 41L	https://www.elsbett.com/epages/63102114_mobile/es_ES/?ObjectPath=/Shops/63102114/Products/80080041	180,00
	Filtro de combustible Febi Bilstein 21622	https://www.amazon.es/Febi-21622-Inyecci%C3%B3n-de-Combustible/dp/B006DHWTE4/ref=sr_1_9?dchild=1&keywords=filtro+diesel&qid=1617635668&sr=8-9	14,40
	Intercambiador de calor WilTec B3-12A-10	https://www.amazon.es/Intercambiador-t%C3%A9rmico-inoxidable-placas-Termocambiador/dp/B002OQYEFU/ref=sr_1_7?mk_es_ES=%C3%85M%C3%85%C5%BD%C3%95%C3%91&crid=1MKXDH1GL987R&dchild=1&keywords=intercambiador+de+calor&qid=1617217908&srefix=intercambiador+de%2Caps%2C171&sr=8-7	30,16
	Bomba de agua Xylem Rule il500P	https://es.rs-online.com/web/p/bombas-de-agua/7632544/	78,69

	<p>Válvula de 3 vías en T Oemclima DN20 B07K7G8ZTQ</p>	<p>https://www.amazon.es/tipo-valorada-motorizada-electrovalorada-pulgada/dp/B07K7G8ZTQ/ref=rtpb_3?pd_rd_w=VEC0G&pf_rd_p=94fbfdea-893a-4865-b548-4736d35ba10d&pf_rd_r=HE786QKJD1DGCR14X54P&pd_rd_r=ee81276b-1360-4c86-a3b2-8ca0ca6aefe4&pd_rd_wg=2CedG&pd_rd_i=B07K7G8ZTQ&th=1</p>	<p>32,00</p>
---	--	--	--------------

Tabla 45: Productos sugeridos para el circuito de combustible. Fuente: elaboración propia.

Foto	Descripción	Enlace	Precio
	Fusible 40A Littlefuse 0287040.PXCN	https://es.rs-online.com/web/p/fusibles-de-coche/7874145/	0,271
	Fusible 2A Littlefuse 0287002.PXCN	https://es.rs-online.com/web/p/fusibles-de-coche/7874126/	0,271
	Relé Moinkerin MY0086	https://www.amazon.es/gp/product/B07GBWGDDX/ref=ppx_yo_dt_b_asin_title_o00_s00?ie=UTF8&psc=1	2,72
	Diodo BOJACK 10SQ050	https://www.amazon.es/BOJACK-Schottky-10SQ050-protecci%C3%B3n-paralelos/dp/B07V418N6T/ref=sr_1_4?mk_es_ES=%C3%85M%C3%85%C5%BD%C3%95%C3%91&dchild=1&keywords=10SQ050&qid=1617633069&sr=8-4	0,50
	Interruptor de Palanca RS PRO 734-7062	https://es.rs-online.com/web/p/interruptores-de-palanca/7347062/	1,94

Tabla 46: Productos sugeridos para el circuito de control. Fuente: elaboración propia.