



UNIVERSIDAD DE JAÉN

**ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE JAÉN
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
Y MINERA**

TESIS DOCTORAL

**CARACTERIZACIÓN DE COMBUSTIBLES
ALTERNATIVOS PARA MOTORES DE ENCENDIDO POR
COMPRESIÓN**

**PRESENTADA POR:
AMALIA PALOMAR TORRES**

**DIRIGIDA POR:
ELOÍSA TORRES JIMÉNEZ
GORAZD BOMBEK**

JAÉN, NOVIEMBRE 2022



UNIVERSITY OF JAÉN

**HIGH POLYTECHNIC SCHOOL OF JAÉN
MECHANICAL AND MINING ENGINEERING
DEPARTMENT**

PhD THESIS

**CHARACTERIZATION OF ALTERNATIVE FUELS FOR
COMPRESSION IGNITION ENGINES**

**AUTHOR:
AMALIA PALOMAR TORRES**

**SUPERVISORS:
ELOÍSA TORRES JIMÉNEZ
GORAZD BOMBEK**

JAÉN, NOVEMBER 2022

ÍNDICE

RESUMEN Y MOTIVACIÓN.....	3
ABSTRACT	4
OBJETIVOS GENERALES	5
CAPÍTULO 0:	7
01. INTRODUCCION Y JUSTIFICACIÓN	7
Combustibles alternativos convencionales.....	9
Combustibles alternativos no convencionales.....	13
02. VIABILIDAD DE LA TESIS DOCTORAL.....	14
CAPÍTULO 1: ESTUDIO Y CARACTERIZACION DE COMBUSTIBLES TOTAL O PARCIALMENTE RENOVABLES	17
SECCIÓN 1.1: Revisión bibliográfica sobre aditivos para mezclas de combustibles bioetanol-gasoil.....	17
INTRODUCCIÓN	17
MATERIALES Y MÉTODOS.....	18
RESULTADOS	19
CONCLUSIONES	21
SECCIÓN 1.2: Estudio experimental de propiedades físico-químicas de nuevos biocombustibles.	22
INTRODUCCIÓN	22
MATERIALES Y MÉTODOS.....	23
RESULTADOS	24
CONCLUSIONES	25
SECCIÓN 1.3: Trabajos previos pendientes de publicación.....	26
CAPÍTULO 2: CARACTERIZACIÓN GEOMÉTRICA Y MECÁNICA DE UN INYECTOR COMMON-RAIL	29
INTRODUCCIÓN	29
MATERIALES Y MÉTODOS.....	30
RESULTADOS	32
CONCLUSIONES	36
CAPÍTULO 3: ESTUDIO Y CARACTERIZACIÓN DE COMBUSTIBLES OBTENIDOS A PARTIR DE REVALORIZACION DE RESIDUOS NO RENOVABLES	37
SECCIÓN 3.1: Pirólisis catalítica de plásticos residuales para la producción de aceites líquidos usando zeolita ZAP USY como catalizador.....	37
INTRODUCCIÓN	37
MATERIALES Y MÉTODOS.....	38
RESULTADOS	40

CONCLUSIONES	49
SECCIÓN 3.2: Efecto de los aceites pirolíticos HDPE y LDPE en la formación de cavitación en un inyector diésel common-rail	50
INTRODUCCIÓN	50
MATERIALES Y MÉTODOS.....	52
RESULTADOS	58
CONCLUSIONES	68
SECCIÓN 3.3: Aceite de pirólisis rápida a partir de residuos plásticos como combustible para centrales eléctricas de turbina de gas.	69
INTRODUCCIÓN	69
MATERIALES Y MÉTODOS.....	70
RESULTADOS	70
CONCLUSIONES	72
CAPÍTULO 4: ESTUDIO PRELIMINAR Y CARACTERIZACIÓN DE COMBUSTIBLES OBTENIDOS A PARTIR DE REVALORIZACIÓN DE RESIDUOS RENOVABLES	75
INTRODUCCIÓN	75
MATERIALES Y MÉTODOS.....	77
RESULTADOS	86
CONCLUSIONES	97
CONCLUSIONES FINALES	99
FINAL CONCLUSIONS.....	101
TRABAJOS FUTUROS.....	103
REFERENCIAS.....	105
ANEXO 1: Publicaciones referidas al Capítulo 1	119
ANEXO 1.1:	119
ANEXO 1.2:	119
ANEXO 2: Publicación referida al Capítulo 2	131
ANEXO 3: Publicaciones referidas al Capítulo 3	141
ANEXO 3.1:	141
ANEXO 3.2:	141
ANEXO 3.3:	142
ANEXO 4: Publicación referida al Capítulo 4	177

RESUMEN Y MOTIVACIÓN

Con la actual normativa cada vez más restrictiva en cuanto a las emisiones contaminantes de los motores térmicos y la alarmante crecida del precio de los combustibles procedentes del petróleo, son muchos los investigadores que trabajan en el desarrollo de combustibles alternativos. En base a la experiencia del grupo de investigación al que pertenezco, se conoce que aún hay inconvenientes a solventar relacionados con el uso de los mismos. La adición de combustibles oxigenados ha demostrado disminuir significativamente la mayoría de las emisiones contaminantes. Por esta razón, se ha planteado estudiar combustibles como el bioetanol y el biodiesel y sus mezclas con gasóleo.

Por otro lado, a raíz del problema ambiental a nivel global surgido por la acumulación y creciente generación de plásticos residuales, investigadores previos han propuesto combatir este problema a partir de la realización de un proceso de pirólisis a dichos residuos. Sin embargo, se ha observado en la bibliografía, que este proceso requiere aún de investigación adicional para ajustar adecuadamente los parámetros del proceso de pirólisis a cada una de las materias primas utilizadas.

ABSTRACT

With the increasingly restrictive regulations regarding polluting emissions from thermal engines and the alarming rise in the price of fuels derived from petroleum, many researchers are working on developing of alternative fuels. Nevertheless, based on the experience of the research group to which I belong, it is known that there are still problems to be solved related to their use. Previous studies have shown that adding oxygenated fuels significantly reduces most polluting emissions. For this reason, the present work proposes to study fuels such as bioethanol and biodiesel and their mixtures with diesel.

On the other hand, due to the global environmental problem arising from plastic waste accumulation and growing generation, previous researchers have proposed mitigating this problem by performing a pyrolysis process. However, it has been observed in the literature that this process still requires additional research to adequately adjust the parameters of the pyrolysis process to each of the raw materials used.

OBJETIVOS GENERALES

- Realizar una revisión bibliográfica de los tipos de aditivos que se emplean a nivel comercial y de investigación con la finalidad de obtener una miscibilidad aceptable en las mezclas de gasoil-bioetanol.
- Caracterizar, en base a algunas propiedades físico-químicas, las mezclas biodiesel-bioetanol para ser empleadas en motores de combustión interna alternativos.
- Caracterizar geométrica y mecánicamente un inyector common-rail con el fin de realizar una simulación del proceso de inyección.
- Analizar la influencia de un catalizador en el proceso de pirólisis de plásticos residuales, con el objetivo de determinar si la calidad del aceite obtenido es óptima para ser utilizado como combustible alternativo.
- Simular el proceso de inyección de los combustibles obtenidos a través de la pirólisis para analizar la influencia de sus propiedades en el fenómeno de cavitación que ocurre en la boquilla del inyector common-rail mencionado y como ésta repercute sobre los parámetros de la inyección.
- Buscar una aplicación viable para los aceites obtenidos de una pirólisis no optimizada.
- Analizar el proceso de secado de biomasa en un secadero rotativo para optimizarlo de tal forma que se pueda, posteriormente, realizar una pirólisis obteniendo así un combustible líquido de origen renovable apto para su uso en motores térmicos.

CAPÍTULO 0:

01. INTRODUCCION Y JUSTIFICACIÓN

Esta introducción comienza resaltando la normativa concerniente y los acuerdos que se han llevado a cabo a nivel internacional con el objetivo de reducir las emisiones de los motores de combustión interna. De esta forma, resaltaremos la importancia del tema a tratar en esta tesis puesto que cualquier acción encaminada a la optimización del sistema de inyección de combustible es la que más influye en la emisión de gases contaminantes y de efecto invernadero.

En 2015, en la Conferencia de París (COP21), fueron 195 países los que aceptaron el primer acuerdo vinculante a nivel mundial sobre el clima [1]. Los puntos más relevantes de éste acuerdo, en cuanto a las emisiones contaminantes, fueron:

- Las emisiones globales deben alcanzar su nivel máximo en 2020.
- Aplicar rápidas reducciones basadas en los criterios científicos.
- Fijar reuniones periódicas cada cinco años para marcar nuevos objetivos basándose en criterios científicos.

La Unión Europea (UE) formó parte de dicho acuerdo y ha desarrollado una estrategia para alcanzar los objetivos expuestos a continuación, respecto a las emisiones contaminantes a corto, medio y largo plazo [2]:

Objetivos clave de la UE para 2020

- Reducir un 20 % las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) con respecto a los niveles de 1990.
- Al menos el 20 % del consumo total de energía debe proceder de energías renovables.
- Incrementar un 20 % la eficiencia energética.

Objetivos clave de la UE para 2030

- Reducir al menos un 40 % las emisiones de GEI con respecto a los niveles de 1990.
- Al menos el 27 % del consumo total de energía debe proceder de energías renovables.
- Incrementar al menos el 27 % de la eficiencia energética.

Objetivo a largo plazo

- Para 2050 la UE pretende reducir sus emisiones, en un 80-95 % con respecto a los niveles de 1990.

A partir de la Conferencia de París de 2015 se han ido celebrando cumbres mundiales sobre el cambio climático: COP22 (2016) en Marrakech (Marruecos), COP23 (2017) en Bonn (Alemania) y COP24 (2018) en Katowice (Polonia); en las que se ha logrado alcanzar un compromiso marcando las reglas de un acuerdo mundial que permite alcanzar los objetivos descritos en la cumbre de París de 2015.

Emisiones contaminantes y legislación

Las emisiones a la atmósfera de sustancias contaminantes, como consecuencia del empleo de combustibles fósiles, es un severo problema que conlleva efectos perjudiciales en la salud de los seres vivos [3].

Entre los productos nocivos emitidos a la atmósfera podemos destacar el monóxido de carbono (CO), el dióxido de carbono (CO₂), los hidrocarburos (HC), los óxidos de nitrógeno (NO_x), las partículas (PM) y los óxidos de azufre (SO_x).

En la actualidad, aproximadamente el 80 % de la energía consumida a nivel mundial proviene de combustibles fósiles, en concreto, en el sector del transporte representa aproximadamente un 95 % de la energía [4]. Este sector es el responsable del 23 % de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), siendo el dióxido de carbono el que posee la tasa más alta entre dichos gases, y es la principal razón del calentamiento global [5].

Con el fin de reducir los efectos negativos que la combustión de los motores diésel provoca en las personas y en el medio ambiente, se han llevado a cabo diversas políticas en el mundo en los últimos años. En Europa, las emisiones se regulan a través de los estándares de emisión de la Comisión Europea (CE) desde 1992 [6]. Esta normativa se conoce como las normas "Euro", y regulan los límites aceptables de emisiones de gases de combustión de los vehículos nuevos vendidos en los Estados Miembros de la Unión Europea. Las normas de emisión se concretan en una serie de directivas de la Unión Europea que se implantan progresivamente y que cada vez son más restrictivas.

Tabla 1. Limitaciones de emisiones para vehículos diésel (Nuevo reglamento Euro 5 y Euro 6.)

	Euro 1	Euro 2	Euro 3	Euro 4	Euro 5	Euro 6
Válida a partir de	01/1992	01/1996	01/2000	01/2005	09/2009	08/2014
NO_x (g/km)	---	0,55	0,50	0,25	0,18	0,08
CO (g/km)	3,16	1,00	0,64	0,50	0,50	0,50
HC (g/km)	---	0,15	0,06	0,05	0,05	0,09
PM	0,14	0,08	0,05	---	0,005	0,005
HC + NO_x (g/km)	1,13	0,70	0,56	0,30	0,23	0,17

En la Tabla 1 se ve cómo la UE ha ido fijando límites cada vez más estrictos, se han ido aprobando las normas Euro que son cada vez más restrictivas en cuanto a emisiones de contaminantes admisibles para un vehículo diésel, como partículas (PM), óxidos de nitrógeno (NO_x), hidrocarburos (HC) inquemados y monóxido de carbono (CO).

El cambio desde la primera norma hasta ahora ha sido notorio, si bien en 1992 un motor diésel podía emitir 140 miligramos de partículas por kilómetro, esta cifra se redujo hasta 4,5 miligramos en 2014. Durante ese mismo período, la limitación de emisiones de NO_x se redujo desde 970 (combinadas con los hidrocarburos inquemados) hasta 80 miligramos por kilómetro [7]. Esta reducción progresiva de las emisiones es el resultado de un compromiso entre la UE y el sector de la automoción para mejorar la calidad del aire.

Durante las últimas décadas, se ha hecho un gran esfuerzo para reducir la dependencia de los combustibles derivados del petróleo, para la generación de energía y el transporte, en todo el mundo. Entre los cambios realizados para disminuir la dependencia de petróleo se ha optado por aumentar la eficiencia de los motores, utilizar combustibles alternativos para reducir emisiones y añadir equipos para el post tratamiento de los gases procedentes del proceso de la combustión.

Las investigaciones sobre la influencia de los combustibles renovables en los motores diésel se pueden dividir en tres partes principalmente. La influencia de las propiedades del combustible en las características del sistema de inyección, la influencia en la formación del chorro y su influencia en el rendimiento del motor diésel y la formación de emisiones [8]. Esto lo han corroborado autores previos para el caso del biodiesel [9]. Además, los sistemas de inyección controlados mecánicamente y electrónicamente deben considerarse por separado debido a sus distintas características.

Dentro de los combustibles alternativos que se han tratado en esta tesis podemos distinguir entre **de origen renovable, no renovable y parcialmente renovable**. Dentro de los no renovables estudiaremos la pirólisis de distintos tipos de plásticos para producir un combustible idóneo con la finalidad de usarse en motores térmicos. Con respecto a los combustibles parcialmente renovables se estudian mezclas de gasoil con distintos alcoholes (etanol, butanol, metanol). Por último, relativo a los combustibles totalmente renovables analizaremos mezclas de bioetanol-biodiesel y combustibles derivados de la pirólisis de biomasa residual del proceso de obtención del aceite de oliva.

Estos combustibles mencionados también se pueden clasificar como **combustibles alternativos convencionales y no convencionales**. Dentro de los primeros consideramos aquellos combustibles que incluyan biodiesel y bioalcoholes mezclados entre ellos o con gasoil. Respecto a los combustibles alternativos no convencionales se estudiará la pirólisis de residuos plásticos y biomásicos.

Combustibles alternativos convencionales

El etanol se usa como un combustible alternativo, un extensor de combustible, un oxigenador y un potenciador de octano. El uso del etanol como componente de mezcla de gasolina puede reducir la cantidad de importaciones de combustible de petróleo hasta en un 10-15%. Además, el uso de etanol,

particularmente el etanol derivado de biomasa, puede generar ahorros significativos en las emisiones de dióxido de carbono [10].

En lo referente a combustibles alternativos de origen renovable, el biodiesel y el diesohol (mezcla de combustible diésel y etanol) son los más estudiados en los últimos años para su aplicación en los motores diésel y podrían ser una alternativa en muchos países para reducir sus importaciones de petróleo. El biodiesel y el diesohol son reconocidos como combustibles alternativos ecológicos porque estudios anteriores han demostrado que existe una considerable reducción de CO, HC no quemados y emisión de partículas (PM), cuando se utilizan en motores diésel convencionales [11,12].

Dentro de la línea de los biocombustibles, el empleo de etanol mezclado con gasoil ha sido objeto de investigación en la década de los 80 y se demostró que las mezclas de etanol y gasoil eran técnicamente aceptables para los motores de encendido por compresión. El coste relativamente alto de la producción de etanol, en ese momento, hacía que dicha mezcla solo pudiera considerarse en casos de escasez de combustible. Recientemente, la economía se ha vuelto mucho más favorable en la producción de etanol y puede competir con el gasóleo estándar [13].

En consecuencia, ha habido un renovado interés en las mezclas de etanol y gasoil, con especial énfasis en la reducción de emisiones [14]. Actualmente, investigadores de todo el mundo [15,16] desarrollan su investigación en el estudio de mezclas de biocombustibles para ser ensayadas en motores diésel, con el objetivo principal ya comentado, reducir las emisiones contaminantes y de efecto invernadero, impulsar las energías renovables y aumentar la eficiencia energética.

En esta misma línea, las mezclas de bioetanol con biodiesel se están estudiando encontrando temperaturas de los gases de escape menores que con mezclas gasóleo-etanol, así como emisiones de HC, CO₂ y NO_x menores que en las mismas [17].

Aunque el biodiesel ha demostrado disminuir las emisiones contaminantes respecto al gasoil [18], la mezcla directa de etanol y gasóleo, llamada e-diésel o diesohol, tiene al menos el mismo potencial para reducir las emisiones de partículas. Sin embargo, el principal inconveniente es que el etanol es inmiscible con combustible diésel en un amplio rango de temperaturas, debido a su diferencia en la estructura y características químicas, lo que lleva a la inestabilidad del combustible debido a la separación de fases. En general, el etanol en bajas proporciones se puede mezclar con gasóleo sin necesidad de modificaciones en el motor [19]. La prevención de esta separación comentada, se puede lograr de dos maneras: agregando un emulsionante, que actúa para suspender pequeñas gotas de etanol dentro del combustible diésel, o agregando un aditivo o codisolvente, que actúa como un agente puente a través de la compatibilidad molecular y la unión para producir una mezcla homogénea [14]. En muchos casos la presencia de un aditivo cosolvente en la mezcla e-diésel se hace necesario [20]. En este artículo se han estudiado las condiciones en las que las mezclas de e-diésel son estables. La estabilidad de las muestras se ve

afectada principalmente por tres factores: temperatura, contenido de agua y contenido inicial de etanol. Los resultados muestran que la presencia de agua en las mezclas, las bajas temperaturas y los altos contenidos de etanol favorecen la separación de fases, mientras que la presencia del aditivo conduce al efecto contrario. Estos efectos se han cuantificado a través de mapas de curvas de nivel para la estabilidad y el tiempo de separación.

Tras una larga búsqueda bibliográfica se plantea el estudio de distintas mezclas gasoil-alcoholes, sin embargo, como ya se ha comentado, la inestabilidad de estas mezclas hace que se requiera de un aditivo. Este estudio ha dado como resultado el artículo titulado *“Revisión bibliográfica sobre aditivos para mezclas de combustibles bioetanol-gasoil”*, el cual queda reflejado en el capítulo 1, sección 1.1, del presente trabajo. Dado que las mezclas biodiesel-bioetanol no presentan problemas de miscibilidad, se centró el estudio en las propiedades físico-químicas de las mismas. El estudio se muestra en la sección 1.2 y ha dado lugar al artículo titulado *“Experimental study of the physicochemical properties of new biofuels”*. Concretamente hablamos de propiedades como densidad y tensión superficial. Esta última propiedad es crucial en la evolución del chorro de combustible a la salida del inyector.

Además, el biodiesel se ha utilizado no solo como una alternativa al gasóleo, sino también como un aditivo para mejorar la estabilidad de la mezcla diesohol (mezcla de etanol con diésel puro) [21]. Las propiedades del biodiesel en frío son pobres y pueden causar problemas en el arranque del motor limitando el uso de biodiesel en climas fríos [22,23]. Otro inconveniente del biodiesel es la tendencia a oxidarse con el aire, especialmente a altas temperaturas [24]. Una forma de superar este inconveniente es mediante la utilización de etanol en la mezcla [25].

La densidad y la viscosidad son dos propiedades físico-químicas clave de un combustible. Los límites de estas están regulados por normativa. Autores previos han determinado estas propiedades para distintos combustibles. Por ejemplo, las mezclas biodiesel-gasoil han sido estudiadas, siguiendo los métodos de prueba ASTM [26]. Se dan ecuaciones generalizadas para predecir la densidad y la viscosidad de estas mezclas en función de la concentración de biodiesel y se emplea una ecuación de mezcla, propuesta originalmente por Arrhenius y descrita por Grunberg y Nissan, para predecir la viscosidad de las mezclas. La densidad en este artículo se ha obtenido basándose en el método de prueba ASTM Standard D941 para medir la densidad del biodiesel, gasóleo y sus mezclas. Las mediciones se realizaron a 15 °C utilizando el densímetro portátil Anton Paar (DMA 35N). Las mediciones se realizaron tres veces para cada muestra y los resultados fueron promediados. En lo referente a la viscosidad, los ensayos realizados por estos autores fueron llevados a cabo con viscosímetros. Para todas las mezclas, se encontró que existe concordancia entre los valores medidos y estimados de la densidad y la viscosidad. Según los resultados, la densidad y la viscosidad de las mezclas aumentan con el aumento de la concentración de biodiesel en la mezcla de combustible.

Autores como [10] obtuvieron las propiedades de mezclas de combustibles (gasoil, biodiesel y etanol) en diferentes proporciones. Se puede observar que la

densidad de las mezclas disminuyó con un aumento del porcentaje de etanol en las mismas. Esto se atribuye al hecho de que el etanol tiene menor densidad y, como tal, disminuye la densidad de la mezcla. Sin embargo, cuando se incrementó el porcentaje de biodiesel, aumentó la densidad, y esto es debido a que el biodiesel de aceite de palma tiene una densidad más alta que los otros dos componentes. Normalmente, se acepta que una mayor densidad conduce a mayor resistencia al flujo de combustible, y por tanto a una mayor viscosidad. Esta mayor viscosidad puede conducir a que la inyección de combustible sea menor. Estos resultados muestran la misma tendencia que los de trabajos anteriores [19].

Una elevada densidad y viscosidad del biodiesel tienen un impacto significativo en el rendimiento de las bombas de combustible y los filtros de combustible, así como en el comportamiento de mezcla de aire y combustible del motor de encendido por compresión [27]. Los autores de este artículo, basándose en procedimientos normalizados, obtienen la densidad y la viscosidad, entre otras propiedades físico-químicas. Para el caso de la densidad, a distintas temperaturas, emplearon un aerómetro de vidrio con una precisión de tres decimales en la medición. La determinación de la viscosidad se llevó a cabo con el empleo de viscosímetros. Se determina midiendo el tiempo que tarda un volumen conocido de combustible que fluye bajo la gravedad para pasar a través de un tubo de viscosímetro capilar de vidrio calibrado.

Una vez realizada una revisión bibliográfica preliminar sobre el estado del arte en el estudio de las propiedades físico-químicas de los biocombustibles, se ha encontrado mucha información sobre la viscosidad y la densidad, entre otras propiedades, sin embargo, se echa en falta más información acerca de uno de nuestros objetivos, que es la determinación de la tensión superficial. Esta propiedad es fundamental para el posterior modelado numérico del proceso de inyección del combustible y posterior desarrollo del chorro de combustible dentro de la cámara de combustión.

Fengkun et al. [28] han determinado experimentalmente la tensión superficial, a presión atmosférica, de mezclas de gasoil y gasolina con aditivos entre los que se encuentra el etanol, concluyendo que el etanol como aditivo contribuye a mejorar la combustión tanto del gasoil como de la gasolina. En cuanto al tipo de aditivo, es destacable mencionar que dependiendo de si es surfactante o cosolvente, puede afectar al resultado de la tensión superficial, consecuentemente, esto afectará a los parámetros de la inyección y posterior evolución del chorro y combustión. Como se ha comentado, estos autores han realizado dichos ensayos para presión atmosférica y además sin variar la temperatura. Sin embargo, durante el proceso de inyección y posterior desarrollo del chorro la temperatura varía, por eso consideramos interesante ampliar este tipo de estudio de la tensión superficial teniendo en cuenta la variación de temperatura, que es otro de los objetivos de la presente tesis.

El estudio de los sistemas de inyección permite reducir las emisiones de los motores diésel y el consumo de combustible mientras, simultáneamente, se mantiene el rendimiento del motor a un nivel aceptable. Dentro de las estrategias a seguir para estos objetivos se consideran la utilización de nuevos combustibles

y de la optimización del motor para su uso eficiente. La mejora de la eficiencia se lleva a cabo a través de estudios experimentales y numéricos. Los datos experimentales concernientes a las propiedades físico-químicas de los combustibles son esenciales para la construcción de un modelo numérico que permita simular el proceso de inyección de combustible e incluso la formación del chorro dentro de la cámara de combustión. No solo estos datos experimentales son necesarios, resulta de gran importancia caracterizar geométrica y mecánicamente un inyector common-rail para simular el proceso de inyección, que es otro de los objetivos de esta tesis. Este estudio ha concluido en la publicación de un artículo titulado *“Geometrical characterization of a solenoid common-rail injector for modelling the injection process”*, dicha información se recoge en el capítulo 2 del presente trabajo.

Combustibles alternativos no convencionales.

Como se ha comentado al inicio de esta introducción también nos hemos centrado en la producción y análisis de **combustibles alternativos por revalorización de residuos no renovables y renovables**. Respecto al primer grupo mencionado, es importante observar que en 2018 se produjeron más de 359 millones de toneladas de plástico en todo el mundo. La mayor parte del plástico se produjo en Asia. Europa es responsable de alrededor del 17 % de la producción mundial de plástico, que representó aproximadamente 62 millones de toneladas en 2018 [29]. El vertido de plástico presenta grandes problemas medioambientales, ya que el plástico en su mayoría no es biodegradable [30]. Los residuos plásticos también se pueden utilizar para la producción de combustibles sintéticos. El empleo de combustibles sintéticos puede reducir la dependencia del consumo de combustibles fósiles, representando más del 90 % de toda la energía consumida por el sector del transporte de la UE [31]. La producción de combustibles sintéticos a partir de residuos plásticos generalmente se realiza mediante pirólisis, la cual ha sido objeto de estudio en la estancia investigadora en el extranjero. Autores como [32] trabajan en ello afirmando que el proceso de pirólisis es muy eficiente debido a su alto potencial de convertir la mayor parte de la energía de los desechos plásticos en aceites líquidos.

En dicha estancia se trabajó continuamente con la instalación para producción de aceite pirolítico, además de realizar diversas modificaciones a la instalación original con el fin de mejorar la calidad de dichos aceites. Se pirolizaron distintos tipos de plástico (HDPE, LDPE, PP, PS) y la influencia de añadir o no un catalizador al proceso. Las propiedades de estos aceites pirolíticos fueron estudiadas y esto ha concluido en la publicación de un artículo del JCR titulado *“Catalytic pyrolysis of plastic wastes for liquid oil’s production using ZAP USY zeolite as a catalyst”*, el cual se refleja en el capítulo 3 (sección 3.1) del presente trabajo. Además, en la sección 3.2, se presenta una simulación del proceso de inyección de estos combustibles obtenidos mediante pirólisis de residuos plásticos mezclados con gasóleo. Dicha simulación es posible a partir del conocimiento de las propiedades físico-químicas obtenidas en la sección anterior del mismo capítulo, así como a la caracterización de la boquilla del inyector. El objetivo principal de simular el proceso de inyección es estudiar el

fenómeno de la cavitación en la boquilla del inyector, ya que afecta directamente a la cantidad de combustible inyectado. Esta información ha dado como resultado la publicación de un artículo del JCR titulado: *“The effect of HDPE and LDPE pyrolytic oils on cavitation formation in a common-rail diesel injector”*, el cual se refleja en el capítulo 3 (sección 3.2) de la presente tesis.

Para finalizar con el capítulo 3, se observó que algunas muestras líquidas de aceites pirolíticos eran de baja calidad, por lo que se estudió la posibilidad de dar una salida viable a este combustible no apto para motores de encendido por compresión. Finalmente se opta por emplear dicho combustible en plantas de producción de energía eléctrica mediante ciclo combinado (turbina de gas-turbina de vapor). Dicha información se recoge en el capítulo 3 de la presente tesis (sección 3.3), que corresponde con la publicación de un artículo titulado *“Fast pyrolysis oil from plastics waste as a Fuel for Gas Turbine Power Plants”*.

Por ultimo con respecto al apartado de revalorización de residuos no renovables, se ha llevado a cabo un estudio preliminar que se centra en la pirólisis de plásticos en dos fases para la obtención de un combustible alternativo apto para su uso en aviación. Esta caracterización queda pendiente para desarrollarse en una estancia postdoctoral.

En lo concerniente a la revalorización de residuos renovables, que corresponde a la última parte del presente trabajo, se ha contemplado utilizar residuos biomásicos como materia prima para obtener un combustible alternativo a través de un proceso de pirólisis, ya que se ha observado que numerosos autores están estudiando este tipo de proceso de obtención de combustibles alternativos [33,34]. Sin embargo, nos centraremos en el residuo biomásico más común en nuestra provincia, el orujillo. Como iniciación a este estudio, se ha comenzado optimizando el proceso de secado de este residuo con el objetivo de hacerlo apto para el proceso de pirólisis. Este estudio queda reflejado en la publicación de un artículo del JCR titulado *“Energy and exergy analysis during drying in rotary dryers from finite control volumes: Applications to the drying of olive stone”*, el cual puede consultarse en el capítulo 4 de la presente tesis.

02. VIABILIDAD DE LA TESIS DOCTORAL

Para la realización de los ensayos experimentales de tensión superficial, es fundamental la colaboración entre dos grupos de investigación PAIDI, el TEP-250 especialista en análisis de biocombustibles, y el TEP-235 el cual posee algunos de los equipos necesarios para poder hacer pruebas a distintos fluidos.

En cuanto a la implicación de los directores de esta tesis, de gran interés resultan las investigaciones llevadas a cabo sobre las propiedades físico-químicas de mezclas biodiesel-etanol, para su empleo en motores diésel [25]. La atención de este artículo, se centra en las propiedades que influyen significativamente en la inyección, las características del motor y, posteriormente, las emisiones de escape. En este contexto, se han investigado experimentalmente las siguientes propiedades: estabilidad del combustible, densidad, viscosidad, punto de obstrucción del filtro en frío, punto de

enturbiamiento, punto de fluidez, punto de inflamación, tendencia a la obstrucción del filtro, corrosividad, lubricidad, espectrometría infrarroja por transformada de Fourier, composición de carbono-hidrógeno-nitrógeno (CHN) y contenido de agua. Las propiedades físicas y químicas del biodiesel y de sus mezclas con etanol se han medido de acuerdo con los requisitos y métodos de prueba para biodiesel [35]. En general, los resultados muestran que el etanol en el biodiesel influye beneficiosamente en las propiedades de combustible mezclado. Potencialmente, esto puede ofrecer la posibilidad de mejorar las características del motor. Además, en [36] también se discuten propiedades físico-químicas de mezclas de etanol con gasoil, midiendo aquellas que influyen significativamente en la inyección y las características del motor. Demostrándose que, para este tipo de mezclas, algunos aditivos son necesarios para mantener la estabilidad de la misma en condiciones de baja temperatura. Algunas propiedades como el punto de enturbiamiento y el punto de fluidez se ven negativamente afectadas por la separación de fases. Se concluye demostrando que se pueden emplear mezclas de gasoil con etanol hasta un 15 % para alimentar motores diésel si las pruebas de rendimiento del motor lo corroboran.

La directora de la presente tesis, estudió durante una de sus estancias de investigación con el grupo al que pertenece el codirector de la misma, la influencia de las propiedades de biodiesel en las características operativas de varios sistemas de inyección controlados mecánicamente, como la cantidad de combustible inyectada por ciclo, la tasa de inyección media, la presión de inyección media, el tiempo de inyección, etc [37]. Esta investigación se llevó a cabo exitosamente gracias a los conocimientos previos que tenía el equipo colaborador [38].

Por otro lado, la colaboración con el grupo de investigación de la Universidad de Maribor al que pertenece mi codirector de tesis, permitirá trabajar con el combustible pirolítico mencionado obtenido por revalorización de residuos plásticos. Posteriormente, se plantea la realización de una estancia de investigación, en la cual basándonos en los conocimientos ya adquiridos se llevará a cabo una mejora de la instalación de pirólisis. Además, se centrará el estudio en el análisis del plástico HDPE por las razones que se explicarán más adelante.

La importancia del análisis de los parámetros de inyección queda de manifiesto en uno de los artículos que publicó previamente la directora de tesis [39]. La atención de este artículo se centra en determinar experimentalmente los principales parámetros de la inyección que influyen significativamente en las características del motor y, posteriormente, en las emisiones de escape. En este artículo se estudió un sistema de inyección mecánico en línea.

A efectos del desarrollo de esta tesis, se pretende obtener la tensión superficial ya que influye directamente en la formación del chorro de combustible, como ya se había comentado anteriormente. Autores como [40] caracterizan numéricamente el chorro de combustible para lo cual es esencial conocer el dato de la tensión superficial, entre otras propiedades del mismo. En este artículo, se analiza la posibilidad de reemplazar los combustibles diésel con diferentes biocombustibles y su objetivo es investigar numéricamente la influencia de los

biocombustibles en los parámetros que caracterizan al chorro, como son: el ángulo y la longitud de un cono de chorro de combustible inyectado, por su influencia en el proceso de combustión y la formación de contaminantes en los motores de combustión interna. Mediante el programa de simulación AVL FIRE investigaron la influencia de diferentes propiedades físicas y químicas del combustible gasóleo, el combustible biodiesel y sus mezclas en las características de la pulverización. Otros autores como [41,42] han realizado un estudio similar, pero utilizando un inyector moderno electrónico tipo common-rail.

El grupo de investigación TEP-250, hasta la fecha, ha publicado artículos referentes a un sistema de inyección mecánico tanto con bomba de inyección en línea [37,39] como rotativa [43,44] pero no se han medido los parámetros del proceso de inyección con inyector common-rail, es decir, con un sistema de inyección electrónico, que es otro de los objetivos de esta tesis.

Además, otro campo en el que trabaja desde hace años el grupo de investigación TEP-250 es el relacionado con el secado de biomasa. Apoyándonos en trabajos previos, se ha seguido esta línea de investigación trabajando en el secado óptimo del orujo con el objetivo de emplearlo como materia prima para el proceso de pirólisis.

Por último, los recursos que ofrece el Centro de Instrumentación Científico Técnico (CICT) de la Universidad de Jaén permiten realizar análisis específicos necesarios para determinar la calidad de los aceites pirolíticos, como, por ejemplo, análisis elemental, espectrometría de masas, etc.

CAPÍTULO 1: ESTUDIO Y CARACTERIZACION DE COMBUSTIBLES TOTAL O PARCIALMENTE RENOVABLES

SECCIÓN 1.1: Revisión bibliográfica sobre aditivos para mezclas de combustibles bioetanol-gasoil

INTRODUCCIÓN

Investigadores de todo el mundo han demostrado, en base a ensayos experimentales, que añadir etanol al gasoil reduce las emisiones contaminantes [45]. Sin embargo, existen muchas barreras técnicas para el uso directo del etanol en el combustible mencionado: de hecho, los motores diésel no pueden funcionar normalmente con mezclas de etanol y gasoil (e-diésel) sin aditivos especiales y, además, por este motivo, la concentración de etanol añadida en la mezcla debe ser baja.

Como ya se ha comentado en la introducción general de la presente tesis, uno de los principales problemas de estas mezclas es la limitada miscibilidad del etanol en el gasoil. De hecho, las mezclas e-diésel no se consideran ni miscibles ni inmiscibles, puesto que la miscibilidad depende de la temperatura, es decir, hay rangos de temperatura en los que es miscible y otros en los que no. Normalmente los investigadores coinciden en que el etanol se disuelve en gasoil a temperatura ambiente y a temperaturas por encima de ésta, mientras que es inmisible para temperaturas inferiores [46]. Sin embargo, la solubilidad de las mezclas e-diésel no solo depende de la temperatura sino de 2 factores adicionales: porcentaje de etanol en la mezcla y contenido de agua en el alcohol [47].

La razón por la que el porcentaje de etanol en la mezcla debe ser bajo se debe a algunas de sus propiedades físico-químicas como su bajo punto de inflamabilidad, baja lubricidad y su reducido poder calorífico [48,49]. Es importante notar que el punto de inflamabilidad mostrará el valor de los componentes más volátiles, es decir, el etanol en este caso. Para evitar este problema, se necesitan aditivos para aumentar el valor del punto de inflamación de la mezcla hasta que quede dentro de los límites requeridos por las normativas. Sin embargo, no se han encontrado estudios previos que propongan un aditivo para solucionar este problema.

Previos autores han concluido que la cantidad máxima de alcohol que se debe utilizar en mezclas e-diésel es de un 15 %, puesto que el uso de esta cantidad de etanol, e inferiores, no requiere realizar ninguna modificación en el motor para su correcto funcionamiento, aunque algunos estudios como [50] han utilizado mezclas e-diésel con porcentajes de alcohol mayores [51].

Otros autores han observado que el contenido de oxígeno considerablemente alto del etanol da como resultado una combustión más limpia que a su vez conduce a una reducción de las emisiones del motor diésel, especialmente de partículas [52]. Sin embargo, el poder calorífico del etanol es menor que el del combustible gasoil y, por lo tanto, su inclusión en el gasoil

disminuye el contenido energético final del combustible [53]. Además, la adición de etanol disminuye la temperatura de ignición [50,54].

Con respecto al problema de la miscibilidad asociado a la temperatura a la que se encuentra la mezcla, Chen et al. y Graboski et al. [55,56] fijan el valor de 10 °C como temperatura límite, por debajo de la cual comenzarían los problemas de separación de estos combustibles.

Además, la cantidad de agua es otro gran inconveniente. El etanol es un compuesto con una elevada tendencia a absorber agua (higroscópico) [47]. La presencia de agua favorece la inestabilidad de las mezclas e-diésel, puesto que se trata de una sustancia polar que intensifica la parte polar de la molécula de etanol. Teniendo en cuenta que el gasóleo es apolar, no es miscible con el etanol [57]. Se han realizado ensayos con etanol hidratado (5 % de agua), concluyendo que ninguna mezcla e-diésel es estable [58]. Es por esto que surge la necesidad de utilizar etanol anhidro en este tipo de mezclas [59]. Siguiendo este razonamiento, cualquier etanol que se use como componente de mezclas para gasolina sería adecuado también para mezclarlo con el gasoil, puesto que, la norma EN 15376:2015 [60] establece que debe presentar menos de un 0,3 % en masa de agua.

Cantidad de investigadores consideran necesaria la incorporación de aditivos a estas mezclas etanol-gasoil para garantizar la estabilidad de la misma [61,62]. Los aditivos que se añaden para evitar la separación de fases son de dos tipos: surfactantes, que influyen por medio de la tensión superficial en la zona de contacto entre las dos fases; y cosolventes, que son agentes que actúan como puentes de unión entre las moléculas de las dos sustancias. Los surfactantes requieren calor para generar la mezcla, sin embargo, los cosolventes aseguran un correcto mezclado con simple agitación.

Otros autores [45,63] añaden como aditivo butanol a las mezclas de gasoil con etanol en proporciones del 5 % para porcentajes de etanol de 10, 20, 25, 30.

MATERIALES Y MÉTODOS

En este tipo de estudios sobre revisión bibliográfica, se recomienda utilizar la denominada “cuantitativa-sistemática” [64]. Dicha revisión cuantifica dónde hay investigación y dónde hay lagunas. Además, es exhaustiva ya que evalúa las diferentes combinaciones examinadas por investigadores y qué han encontrado.

Concretando, los parámetros de búsqueda para esta investigación, siguiendo el procedimiento anteriormente mencionado, son los siguientes:

- Tema: “Aditivos para mezclas etanol-diésel”
- Cuestiones a responder: ¿qué propiedades empeoran al añadir etanol al gasoil?, ¿qué parámetros afectan a la estabilidad de la mezcla?, ¿cuál es la temperatura de separación de fases en las mezclas e-diésel para cualquier concentración de etanol presente

en la mezcla?, ¿cuáles son los aditivos existentes en el mercado?, ¿qué aditivo proponen previos autores como el más idóneo?

- Bases de datos: Google Scholar, Web of Science (WOS) y Scopus.
- Palabras clave: “diesel-ethanol”, “e-diesel”, “additive”, “stability”, “flash point”, “lubricity”, “heating value”, “biodiesel”
- Filtros: Sin restricción en fecha de publicación ni tipo de publicación.
- Parámetros recogidos: título, autores, revista, campo de estudio, tema, objetivos, métodos, resultados cuantitativos y conclusiones.

RESULTADOS

A pesar del amplio número de investigadores que tratan de encontrar el aditivo ideal para garantizar estabilidad de las mezclas e-diésel, así como para reducir las emisiones contaminantes que produce su uso en motores de combustión, son muy escasos los autores que investigan acerca de cómo varía la estabilidad de mezclas e-diésel al incorporar distintas cantidades y tipos de aditivos, para así, poder determinar la cantidad idónea de estos compuestos.

Uno de los primeros trabajos que mostró diagramas de estabilidad de las mezclas e-diésel con un aditivo para evitar la separación de fases fue el desarrollado por Letcher et al. [65] a principios de los años 80. El aditivo utilizado fue el acetato de etilo (cosolvente). Los resultados de este estudio fueron presentados en un diagrama ternario para las temperaturas de 30, 15 y 0 °C comprobando cómo la región de estabilidad aumenta a medida que lo hace la temperatura. A partir de estos resultados el autor concluyó que la relación acetato de etilo/etanol debería ser de 1:2 para asegurar la estabilidad de las mezclas.

Actualmente, existen numerosas empresas que se dedican a producir aditivos para mezclas etanol-gasoil. AAE TECHNOLOGIES, AKZO-NOBEL y BETZ-DEARBORN son algunas de las compañías que generan surfactantes, mientras que O2Diesel [66] generalmente comercializa paquetes de aditivos cosolventes. Desafortunadamente, la mayoría de estas empresas no aportan información acerca de la composición de sus productos, pero sí se sabe que, en determinadas ocasiones, algunos aditivos no sólo mejoran la estabilidad, sino que llevan compuestos que mejoran otras propiedades de los combustibles como la lubricidad y el número de cetano. Pure Energy Corporation fabrica un producto de emulsión gasoil-etanol llamado Puranol [67]. Es un aditivo no tóxico que, cuando se agrega al gasóleo en una concentración de 1 a 3 %, permite mezclas de hasta 15 % de etanol. Otro producto es O2Diesel, el cual es un combustible para motores diésel comercializado por la empresa O2Diesel Inc. y es una mezcla de aditivo Octimax 4931 con etanol al 7,7 % y gasoil de muy bajo contenido en azufre (ULSD, del inglés Ultra Low Sulfur Diesel). Tanto Puranol como O2Diesel tienen contenidos energéticos similares al gasóleo.

Investigadores como [68] han trabajado con aditivos que provienen también de los fabricantes comentados anteriormente (Pure Energy Corporation (PEC), AAE Technology y Betz-Dearborn). Este último fabricante ha desarrollado

un aditivo derivado exclusivamente del petróleo, mientras que los aditivos fabricados por las otras dos empresas se producen a partir de recursos renovables.

Huang et al. [69] determinaron el tiempo que tardaban en aparecer las dos fases indicativas del proceso de separación para mezclas al 10 %, 20 %, 25 %, y 30 % de etanol en gasoil (E10, E20, E25 y E30, respectivamente). Mientras que la mezcla con mayor cantidad de alcohol sólo tardaba 5 minutos en separarse, eran necesarios tres días para ver este efecto en la mezcla E10. A cada una de estas mezclas se le incorporó un 5 % de un solvente (n-butanol), comprobando que el tiempo requerido para que se separasen las fases se incrementaba a 11 días, mientras que la mezcla E10 apenas presentaba fase separada.

Investigadores como [20] han realizado ensayos experimentales para mezclas de bioetanol-gasoil con porcentajes de etanol desde un 5 % a un 20 %, variando también el porcentaje de agua (0 % - 2,5 %) y aditivo (0 % - 5 %). Han demostrado cómo un aumento del contenido de agua en la mezcla e-diésel provoca una separación de fases para contenidos de etanol bajos. Cuando la temperatura decrece, es necesario menos concentración de etanol para la separación. En este artículo se trabaja con un aditivo añadido proporcionado por O2DIESEL. Los autores concluyen afirmando que en países donde las temperaturas invernales no desciendan por debajo de -5 °C, las mezclas con contenidos de etanol de hasta el 10 % en volumen son válidas para su uso en motores diésel.

Se puede decir que, de entre todos los problemas que presenta el combustible e-diésel, la separación de las fases es el mayor inconveniente que limita el uso de estas mezclas en un motor de combustión [55]. Por tanto, la utilización del combustible e-diésel requiere añadir bajas concentraciones de etanol o emulsionantes y tensioactivos que aseguren la estabilidad de la mezcla. Un ejemplo de estos aditivos es: los ésteres metílicos de ácidos grasos (FAME) [70], el dodecil sulfato de sodio [48], el acetato de etilo, o el tetrahidrofurano [71].

Puesto que los aditivos comerciales no son fáciles de conseguir y, normalmente están sujetos a una patente, un gran número de investigadores están estudiando la idoneidad del biodiesel (FAME) como aditivo a las mezclas etanol-gasoil, ya que han comprobado que no solo se consigue una buena estabilidad de las mismas, sino que también mejora propiedades que empeoraban con la adición del etanol, como son la lubricidad, el número de cetano, etc.

El biodiesel es un compuesto que actúa como agente estabilizante evitando la separación de las mezclas e-diésel. Las moléculas del biodiesel presentan un extremo de carácter polar que tiene más afinidad con el etanol y una cadena carbonosa apolar que tiende a unirse al gasóleo. Esta orientación mantiene a las micelas en un estado termodinámicamente estable [72]. Hay autores que consideran que el biodiesel actúa como cosolvente en las mezclas e-diésel, mientras que otros establecen que es un tensioactivo [73]. Además de

mejorar la estabilidad, la utilización de biodiesel en las mezclas etanol-gasoil presenta una serie de ventajas que otros aditivos o compuestos no poseen:

- Es un compuesto renovable.
- El alto número de cetano que presenta el biodiesel compensa la reducción obtenida en este parámetro al mezclar el etanol con el gasóleo. De hecho, el éster también puede actuar en este caso como mejorador de cetano.
- Presenta buenas propiedades lubricantes, al contrario que el etanol, compensando el efecto negativo que el alcohol aporta a las mezclas.

En otro trabajo realizado por [73] se analizan mezclas ternarias etanol-biodiesel-gasóleo (e-b-diésel) con porcentajes de etanol en gasoil de 5 %, 10 %, 15 %, 20 %, 25 % y 30 % a distintas temperaturas para determinar a partir de la cual dejan de ser estables y las características de las fases generadas en el proceso de separación. Los resultados muestran que cuando no está presente el biodiesel, la temperatura a la que se produce la separación de todas las mezclas e-diésel está alrededor de los 10 °C, por debajo de la cual se obtienen varias fases líquidas/cristalinas. Cuando se empieza a añadir biodiesel a estas mezclas, la temperatura de desestabilización disminuye notablemente hasta llegar a -10 °C para un 30 % de biodiesel, condiciones en las que aparece una fase gel. A partir de este porcentaje, a medida que se va incrementado la cantidad de éster en las mezclas, la temperatura a la cual se separan las fases aumenta nuevamente.

El efecto de la temperatura sobre las mezclas ternarias e-b-diésel lo ha estudiado Shi et al. [59], quienes comprobaron que mientras que a 10 °C la mayor parte de mezclas e-diésel son inestables (salvo 0 – 20 % y 90 – 100 % de etanol), a medida que aumenta la temperatura el rango de mezclas estables aumenta. De hecho, el aspecto gelatinoso que presentan varias mezclas etanol-biodiesel a 10 °C desaparece a temperaturas mayores. Según estos autores, a 40 °C todas las mezclas posibles dentro de un diagrama ternario etanol-biodiesel-gasoil son estables.

CONCLUSIONES

Se han estudiado los aditivos existentes que permiten solventar alguno de los inconvenientes que presentan las mezclas etanol-gasoil para su uso en motores de encendido por compresión. La revisión se ha basado en un análisis cuantitativo-sistemático y ha permitido detectar los principales inconvenientes, entre los que destacan: separación de los componentes de la mezcla, baja lubricidad, bajo número de cetano, bajo poder calorífico y alteración significativa del punto de inflamación.

Respecto a la miscibilidad de las mezclas e-diésel, ésta depende de tres factores fundamentalmente: temperatura, contenido de etanol en la mezcla,

contenido de agua. Para solventar este problema, es necesario añadir un aditivo a las mezclas etanol-gasoil y garantizar con ello que, en el proceso de inyección de combustible, la mezcla sea uniforme. Para bajas proporciones de alcohol no es necesario dicho aditivo ya que se mantiene la estabilidad, aunque también entra en juego la temperatura.

Empresas como AAE TECHNOLOGIES, AKZO-NOBEL, BETZ-DEARBORN producen aditivos surfactantes, mientras que O2diesel y Pure Energy Corporation trabajan con cosolventes. Puesto que los aditivos comerciales no son fáciles de conseguir y, además, hay una falta de información notoria sobre las cualidades de estos aditivos, la mayoría de los investigadores proponen al biodiesel como el aditivo idóneo para mantener la estabilidad de las mezclas etanol-gasoil ya que, además, mejora algunas propiedades que empeoraban con la adición de etanol como son: la lubricidad, el número de cetano y el poder calorífico. Sin embargo, el problema del bajo punto de inflamación está aún por resolver.

Se puede concluir que, cuando no está presente el biodiesel, la temperatura por debajo de la cual se produce la separación de cualquier mezcla e-diésel, independientemente de la proporción de cada componente en la mezcla, está alrededor de los 10 °C. Cuando se comienza a añadir biodiesel a las mezclas, la temperatura de desestabilización disminuye hasta llegar a -10 °C para un 30 % de biodiesel, condiciones en las que aparece una fase gel. Para porcentajes mayores, a medida que se va incrementado la cantidad de biodiesel en las mezclas, la temperatura a la cual se separan las fases aumenta nuevamente.

SECCIÓN 1.2: Estudio experimental de propiedades físico-químicas de nuevos biocombustibles.

INTRODUCCIÓN

Dado que las mezclas biodiesel-bioetanol no presentan problemas de miscibilidad, nos centramos en el estudio de las mismas para la caracterización de dicho combustible alternativo de origen totalmente renovable.

En este trabajo se obtienen experimentalmente algunas propiedades físicas de varios biocombustibles, que se utilizan en motores de encendido por compresión. Estas propiedades son esenciales cuando se simulan procesos de inyección en el motor y el chorro de combustible [74,75]. Las propiedades medidas son la densidad y la tensión superficial. La densidad se mide mediante el uso de un picnómetro y la tensión superficial mediante un equipo comercial (Krüss-EasyDyne). Los combustibles caracterizados se pueden consultar en la Tabla 2 y son: gasoil (D100), biodiesel (B100) y mezclas de biodiesel-bioetanol (B75E25, B50E50, B25E75). Se cuantifican la densidad y la tensión superficial, verificando que la densidad sea proporcional a la concentración de cada combustible en la mezcla. Sin embargo, este no es el caso de la tensión superficial, que se ajusta a un polinomio de segundo orden.

El interés de este artículo se centra en conocer valores exactos de tensión superficial a distintas temperaturas para poder emplearlos en la simulación del proceso de inyección.

MATERIALES Y MÉTODOS

Tabla 2: Combustibles a caracterizar

Nomenclatura	%Bioetanol	%Biodiesel	%Gasoil
E100	100	0	0
B100	0	100	0
D100	0	0	100
B75E25	25	75	0
B50E50	50	50	0
B25E75	75	25	0



Figura 1: Mezclas Biodiesel-bioetanol

El proceso de medida para la obtención de la densidad consiste en llenar completamente el picnómetro, evitando la formación de burbujas en su interior. Al cerrar, el nivel del líquido subirá por el capilar y se desbordará, quedando también el capilar lleno. Finalmente, nivelaremos con la jeringa hasta la marca de calibración (Figura 2a). Una cuestión clave en el proceso experimental del picnómetro es la dificultad durante el proceso de nivelación, debido a la formación de burbujas no deseadas en el capilar.

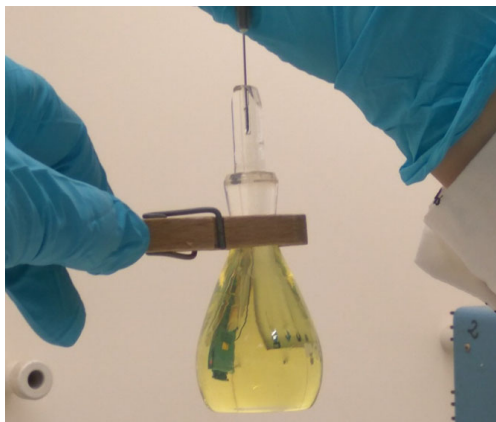


Figura 2: a) Enrasado del picnómetro

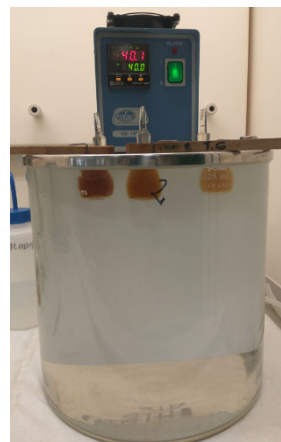


Figura 2: b) Picnómetros en baño

El picnómetro permite medir con precisión la densidad de un líquido. En este caso, el picnómetro utilizado (POBEL) está calibrado a 20 °C. Según su certificado de calibración, su peso (m_p) y volumen (V_p) son 29,1872 g y 24,629 ml, respectivamente. Resulta sencillo calcular la densidad de la mezcla (ρ_d) como la relación entre la masa de la solución que se encuentra en el picnómetro (m_d) y su volumen (V_p). Por otro lado, el valor de la masa de la muestra (m_d) será la diferencia entre la masa del picnómetro lleno (m_{p+d}) y la del picnómetro vacío (m_p), ambas masas se obtienen experimentalmente mediante una balanza analítica. Los datos correspondientes a dichas pesadas se pueden consultar en el artículo adjuntado en el Anexo 1.2. La Tabla 3 muestra los resultados de densidad obtenidos al aplicar la ec.1.

$$\rho_d = \frac{m_d}{V_p} = \frac{m_{p+d} - m_p}{V_p} \quad (1)$$

La propiedad por excelencia estudiada en este artículo, la tensión superficial, se mide con el tensiómetro EasyDyne que se muestra en la Figura 3. El proceso de medición en este equipo es bastante simple. Consiste en una placa (Figura 4) que se sumerge en el fluido objeto de estudio, proporcionando un valor medio de tensión superficial (σ (mN/m)) sobre diez medidas que realiza. Además, este equipo es muy completo, ya que también nos proporciona la incertidumbre de medida ($\Delta\sigma$ (mN/m)). A pesar de la facilidad en el uso de este equipo, es importante señalar que tanto el plato de medición como el recipiente deben estar muy limpios y desinfectados después de realizar la nueva medición, ya que los residuos de la prueba anterior, que quedan adheridos a la pared del recipiente, pueden hacer que la siguiente medida no sea precisa. La Tabla 3 muestra los resultados de tensión superficial obtenidos utilizando el tensiómetro EasyDyne.

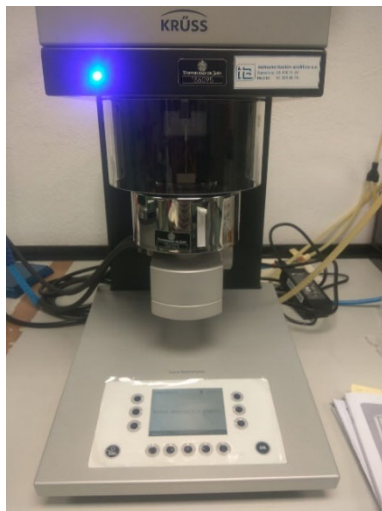


Figura 3: Equipo Easy-Dyne

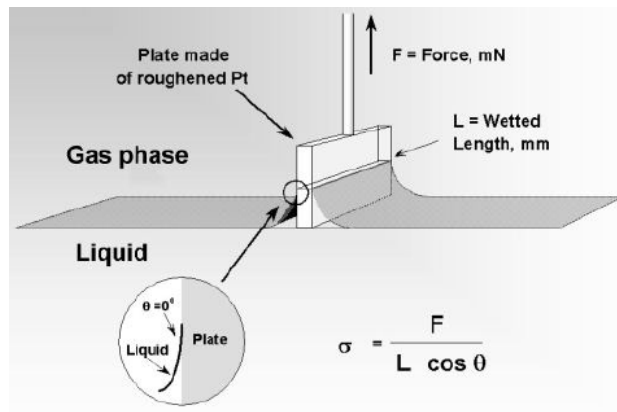


Figura 4: Placa de medida [76]

RESULTADOS

Los resultados obtenidos experimentalmente mediante el empleo del picnómetro (densidad) y el uso del tensiómetro (tensión superficial), se muestran en la Tabla 3. Además, se corrobora que la densidad de la mezcla es proporcional a la concentración de cada combustible puro en la mezcla a través de aplicar un ajuste lineal, ec.2, y comparando con el resultado obtenido experimentalmente. (Ver la densidad de B75E25 en la Tabla 3).

$$75\% \rho_{B100} + 25\% \rho_{E100} = 0,75 * 877,855 + 0,25 * 785,781 = 854,836 \quad (2)$$

Tabla 3: Resultados de las propiedades comentadas

	Medidos experimentalmente		Ajuste lineal, ec.2
	Densidad, ρ , (kg/m ³)	Tensión superficial, σ , (mN/m)	Densidad, ρ , (kg/m ³)
Etanol	785,781	22,4	—
Biodiesel	877,855	30,7	—
Gasóleo	825,884	26,7	—
B75E25	855,655	26,7	854,836
B50E50	834,558	24,4	831,818
B25E75	812,138	23,4	808,799

La figura 5 representa los valores de densidad en función de la concentración de biodiesel en la mezcla, es decir, representa a partir del 0 % de biodiesel (100E); 25B75E; 50B50E; 75B25E; hasta 100 % biodiesel (100B).

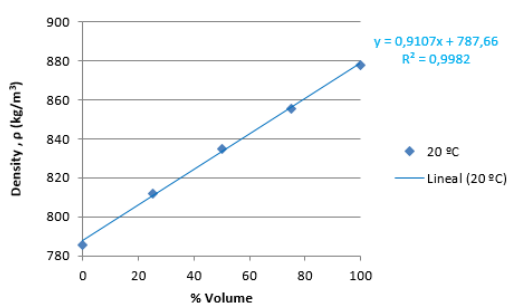


Fig. 5. Densidad (kg/m³) frente a (%v/v) biodiesel.

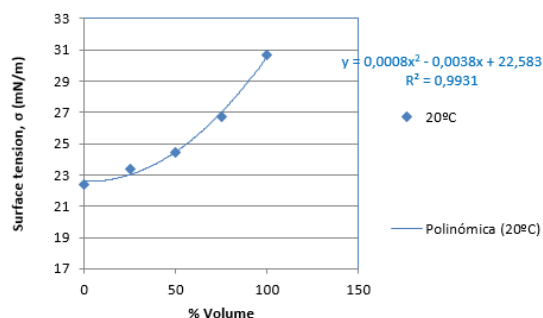


Fig. 6. Tensión superficial (mN/m) frente a (%v/v) biodiesel.

La figura 6 muestra los resultados obtenidos de la tensión superficial. Además, se observa que estos resultados se ajustan con bastante precisión a un polinomio de segundo orden, ya que R^2 (coeficiente de determinación) es muy próximo a 1, por lo que los valores no siguen una tendencia lineal como en el caso de la densidad.

CONCLUSIONES

Se corroboró que la densidad es proporcional a la concentración de cada combustible puro en la mezcla. La densidad aumenta linealmente a medida que aumenta la concentración de biodiesel en etanol.

Consideramos que la propiedad del combustible más importante a obtener experimentalmente es la tensión superficial, debido a la falta de información bibliográfica.

A la vista de los resultados obtenidos, la tensión superficial de las mezclas biodiesel-etanol aumenta al aumentar la concentración de biodiesel en el etanol. Sin embargo, este incremento no es lineal. La tensión superficial se ajusta a un polinomio de segundo orden.

SECCIÓN 1.3: Trabajos previos pendientes de publicación

Como trabajo preliminar a este capítulo, ampliando la información estudiada que no queda reflejada en ningún artículo de la presente tesis, se han mezclado en distintas proporciones gasóleo con distintos alcoholes y se ha estudiado su homogeneidad, añadiendo un aditivo cuando fuese necesario para solventar el problema de la separación de fases. Las mezclas realizadas se han basado en las conclusiones de autores previos como [63].

Se preparan mezclas binarias **etanol-gasoil** para obtener las propiedades de interés a temperaturas altas, ya que ahí sí son estables. Por lo que se estudian mezclas (%v/v) desde 95D5E hasta 70D30E, Figura 7a. Sin embargo, como se ha comentado, esta mezcla presenta grandes problemas de miscibilidad y es por esto que, apoyándonos en investigaciones previas reflejadas al inicio de este capítulo, se emplea como aditivo butanol en una proporción del 5 %. En base a esto se preparan mezclas ternarias **etanol-gasoil-butanol** para trabajar con ellas en las temperaturas más bajas (Figura 7b). Aclarar que además se han medido las propiedades de estas mezclas ternarias a altas temperaturas, aprovechando la estabilidad en todo el rango de temperaturas estudiadas. Estas mezclas ternarias se preparan (%v/v) desde 90D5E5But hasta 65D30E5But.

Para el caso de las mezclas **metanol-gasoil**, autores como [77,78] las han ensayado con porcentajes del 1 % de dodecanol para muestras con porcentaje de metanol no superior al 15 %. Teniendo en cuenta que esta mezcla es la que peor estabilidad posee, directamente preparamos mezclas ternarias con dodecanol 1 %. Se estudian (%v/v) 96,5D2,5M1Dodec, 94D5M1Dodec, 91,5D7,5M1Dodec, 89D10M1Dodec, 86,5D12,5M1Dodec, 84D15M1Dodec. Otros autores como [79] emplean butanol para mantener la estabilidad de estas mezclas.

Con respecto a las mezclas **butanol-gasoil** no se encuentran problemas de miscibilidad, ni si quiera a bajas temperaturas, por lo que no es necesario añadir ningún aditivo. Se preparan las mezclas (%v/v) desde 95D5But hasta 70D30But. Autores como [80] trabajan con dichas mezclas con porcentajes de alcohol no superiores al 25 %.

Para finalizar, como conclusión adicional, resulta interesante comentar que algunas de las mezclas, basándonos en autores previos, supuestamente serían miscibles y tras la preparación de las mismas en el laboratorio se ha comprobado que no lo eran, por lo que aparecen nuestros diagramas de estabilidad (Figura 7a y 7b).

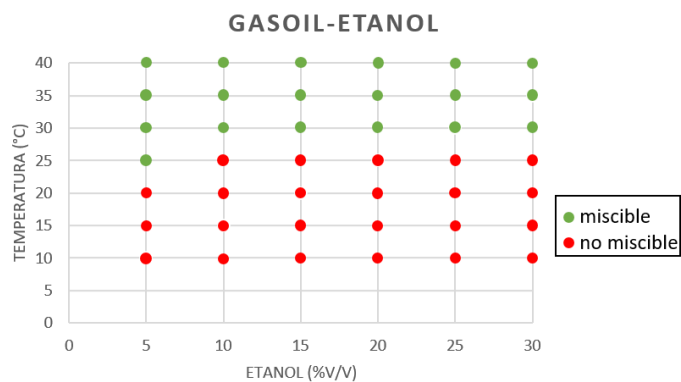


Figura 7a) Estabilidad de las mezclas (%v/v) desde 95D5E hasta 70D30E

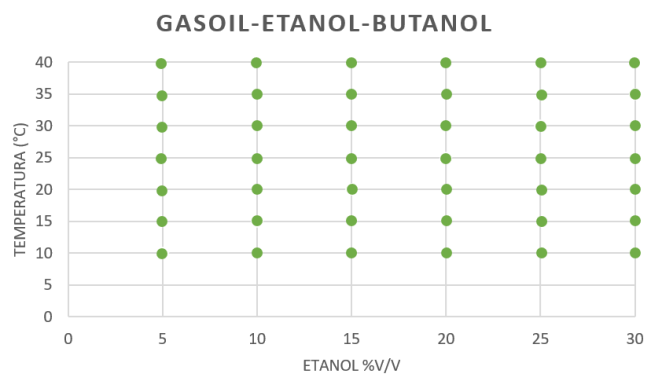


Figura 7b) Estabilidad de las mezclas (%v/v) desde 90D5E5BUT hasta 65D30E5BUT

CAPÍTULO 2: CARACTERIZACIÓN GEOMÉTRICA Y MECÁNICA DE UN INYECTOR COMMON-RAIL

INTRODUCCIÓN

La principal motivación de estudio de un inyector common-rail reside en el aliciente de optimizar los sistemas de inyección tanto para el ahorro de combustible como para la reducción de emisiones contaminantes a la atmósfera.

Como ya se comentó y se justificó en la introducción general, uno de los puntos clave en la reducción de emisiones es la mejora del proceso de combustión y, por ende, de la inyección en los vehículos diésel. Por ello, hoy en día existe una constante búsqueda de mejorar los sistemas de inyección para encontrar la manera óptima de proporcionar la adecuada dosificación junto con un bajo consumo y un mínimo de emisiones contaminantes.

Para el estudio de los procesos de inyección, se suele recurrir a la simulación como método científico de investigación, es por este motivo que se propone un modelo matemático 1D como ayuda para que en un futuro se puedan desarrollar simulaciones que permitan la optimización del proceso de inyección. Sin embargo, para poder simular el comportamiento adecuadamente, es necesario conocer la geometría del inyector de antemano, debido a que influye directamente en la pulverización del combustible y en cómo se mezcla con el aire en la cámara de combustión, por ejemplo: sabemos que la mezcla queda determinada por el número de orificios de la tobera y de su dirección, o lo que es lo mismo, del diámetro de los orificios de salida del combustible y su inclinación [81].

Como se acaba de señalar, a la hora de modelar el proceso de inyección es necesario definir de forma precisa la geometría de cada conducto interior del inyector y de sus partes móviles. Además, se deben caracterizar mecánicamente sus componentes internos. Esta información nunca la proporcionan los fabricantes. Por este motivo, algunos investigadores del área de máquinas y motores térmicos han centrado sus esfuerzos en desarrollar técnicas de ingeniería inversa para caracterizar geométricamente, y de la forma más precisa posible, el interior de un inyector. Un ejemplo de estas técnicas es el método de la silicona.

En el proceso de caracterización geométrica que hemos realizado, empleamos herramientas convencionales de medida, pero además, el innovador “método de la silicona” propuesto por Macián et al., [82] para medir cavidades interiores. Además, se propone un novedoso método para el cálculo de las constantes de los resortes. Gracias a estas medidas hemos podido realizar también un modelo 3D completo del inyector seleccionado, el cual podrá usarse posteriormente para modelar el proceso de inyección de combustible a través del inyector seleccionado. Además, la precisión de la metodología de silicona se probó mediante la comparación con las mediciones de rayos X de la boquilla del inyector.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se estudia un inyector solenoide common-rail modelo Denso 7H150 (1600-BN800-07Q00017) utilizado en vehículos NISSAN. Para la determinación de su geometría interna se procede a su desmontaje. Es requerido realizar algunos cortes en sus componentes para poder medir conductos y volúmenes internos (Figura 8); en particular, se realizaron dos cortes, uno longitudinal y otro transversal, por lo que fue posible medir la variación de diámetro en el canal de entrada de combustible.



Figura 8. Corte en el cuerpo del inyector

Para la caracterización geométrica tanto externa como interna del inyector se utilizaron los siguientes aparatos de medición convencionales:

Proyector de perfiles, Modelo Nikon V-10AD/V-10 (Figura 9). Además de medir distancias en x e y, permite medir ángulos. La resolución de la longitud es de 0,001 mm, mientras que la resolución de los ángulos es de 0,01°. Su incertidumbre expandida se indica en su certificado de calibración [83], siendo $U_{95} = 8 \mu\text{m}$ para el eje x y $U_{95} = 5 \mu\text{m}$ para el eje y.



Figura 9. Proyector de perfiles

El calibre o Pie de Rey (Figura 10) tiene una resolución de $1/m$, donde m es el número de divisiones de la escala Vernier (métrica). En nuestro caso, $m=50$, y su resolución es de 0,02 mm. Al no disponer de su certificado de calibración, se estima su incertidumbre en función de su resolución, resultando 0,01 mm.



Figura 10. Calibre

El micrómetro de exteriores (Figura 11) posee una resolución de 0,02 mm ya que tiene 50 divisiones. Como no disponemos de su certificado de calibración, encontraremos su incertidumbre como anteriormente, es decir, a partir de su resolución, resultando 0,01 mm.



Figura 11. Micrómetro para mediciones exteriores

Micrómetro de interiores (Figura 12), con una resolución de 0,001 mm ya que tiene 100 divisiones. En este caso, el fabricante proporcionó la incertidumbre del micrómetro en el certificado de calibración: $U_{95} = 2 \mu\text{m}$.



Figura 12. Micrómetro para mediciones interiores

Cada medida se tomó diez veces para calcular la media aritmética " $\bar{x}$ " y la incertidumbre se ha estimado tipo A según la Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medida [84].

Tal y como se ha comentado en la introducción de este capítulo, los conductos y volúmenes internos del inyector poseen pequeñas dimensiones, apenas perceptibles a la vista, que no son susceptibles de ser medidas con las herramientas anteriores, por ende, se opta por emplear esta la técnica basada en el **método de la silicona**. El objetivo es elaborar un molde para medir la geometría interna de la boquilla del inyector, la cual es uno de los componentes más importantes a la hora de caracterizar un inyector ya que influye en la aspersión de combustible, la combustión y las posteriores emisiones [85,86].

Para mayor precisión, también se verificarán las medidas obtenidas a través de la metodología de la silicona. La validación contrastará dichas medidas con aquellas obtenidas aplicando la técnica de rayos X.

Señalar que, a la hora de medir moldes de silicona, la medida solo se puede realizar mediante instrumentos ópticos ya que otras herramientas convencionales, como el calibre o los micrómetros, necesitan contacto para medir y, teniendo en cuenta que el molde es muy elástico, podrían deformarse fácilmente e inducir consecuentemente errores en los resultados. En nuestro caso, utilizamos el proyector de perfiles descrito anteriormente.

La silicona comprada (Figura 13) es de uso común en odontología. En concreto, hemos utilizado la silicona: "Elite doble 8" y "Elite doble 16" junto con sus respectivos catalizadores del fabricante Zhermack. Ambas difieren en su elasticidad y tiempo de secado, siendo la 8 mucho más elástica y tardando más en secarse que la 16.



Figura 13. a) Silicona Elite Double 8



Figura 13. b) Silicona Elite Double 16

Los principales pasos para hacer un molde de silicona son los siguientes:

- 1) Limpiar en profundidad la pieza deseada para eliminar restos de combustible o partículas sólidas mediante baño de ultrasonidos. Se emplea acetona como disolvente para potenciar el efecto de limpieza y evitar una posible formación de óxido.
- 2) Preparar la mezcla de siliconas: mezclar el fluido base con su respectivo catalizador en proporción 1:1. Mezclar durante 1 minuto.
- 3) Verter la mezcla en el hueco a medir y dejar reposar hasta que se seque por completo. El tiempo de secado se indica en cada botella, siendo diez minutos para la silicona "Elite Double 16" y veinte minutos para "Elite Double 8".
- 4) Para verter adecuadamente la mezcla en las cavidades de geometría compleja y dimensiones mínimas, se requiere una jeringa con aguja para garantizar que la silicona llegue a la cavidad del orificio. Por supuesto es crucial evitar la formación de burbujas.
- 5) Una vez seca la silicona, extraer el molde obtenido tirando de él con la ayuda de un objeto o utilizando aire comprimido.

Para el diseño 3D del inyector utilizamos un software CAD, concretamente el programa "**SolidWorks**" versión 2017. En primer lugar, dibujamos cada pieza y, a continuación, se ensamblan todos los componentes. Además, con el complemento "**PhotoView 360**", podemos renderizar las piezas y obtener fotografías del modelo con gran realismo.

RESULTADOS

La Tabla 4 muestra un ejemplo de algunas medidas obtenidas utilizando el proyector de perfiles, mientras que la Tabla 5 recoge la misma información empleando moldes de silicona. En la Tabla 6 se muestra un ejemplo de algunas medidas obtenidas con el pie de rey y micrómetros. La nomenclatura de las dimensiones se detalla en las Figuras 14, 15 y 16.

Tabla 4. Medidas obtenidas mediante proyector de perfiles

	Dimensiones						
	D1	L1	R1	R2	D2	L5	L6
1	2,176	3,581	0,101	0,373	3,998	2,312	2,896
2	2,171	3,561	0,098	0,340	4,006	2,323	2,900
3	2,154	3,559	0,098	0,344	4,003	2,307	2,908
4	2,156	3,572	0,093	0,326	4,005	2,320	2,906
5	2,181	3,564	0,095	0,313	3,994	2,305	2,912
6	2,174	3,560	0,103	0,346	3,997	2,303	2,906
7	2,157	3,556	0,106	0,348	3,995	2,306	2,905
8	2,180	3,577	0,099	0,359	4,001	2,312	2,907
9	2,176	3,560	0,099	0,326	4,003	2,317	2,905
10	2,158	3,570	0,100	0,344	4,006	2,312	2,908
Valor medio							
	2,168	3,566	0,099	0,342	4,001	2,312	2,905
Incertidumbre							
	0,011	0,008	0,004	0,017	0,005	0,007	0,004

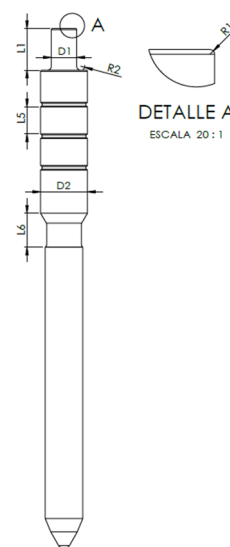


Figura 14. Esquema de la aguja del inyector.

Tabla 5. Medidas obtenidas utilizando el proyector de perfiles en un molde de silicona de la boquilla.

Dimensión Medida	Di1	ai1	Di1'	Di4
1	3,910	59,40	3,892	0,146
2	3,915	59,38	3,89	0,149
3	3,912	59,10	3,88	0,144
4	3,918	59,23	3,887	0,146
5	3,921	59,24	3,894	0,144
6	3,920	59,06	3,893	0,150
7	3,910	59,16	3,889	0,148
8	3,910	59,42	3,888	0,142
9	3,910	59,52	3,888	0,150
10	3,910	59,06	3,893	0,144
Valor medio	3,914	59,26	3,889	0,146
Incertidumbre	0,005	0,16	0,004	0,003

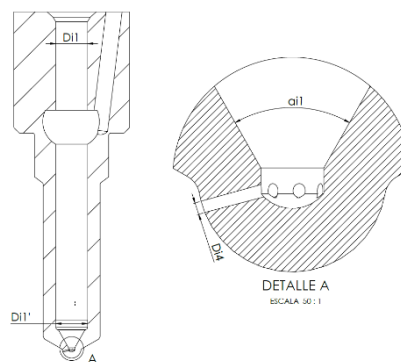


Figura 15. Esquema de la boquilla del inyector.

Tabla 6. Medidas obtenidas con pie de rey y micrómetros en el cuerpo del inyector.

Dimensión Medida	De1	De2	de1	de2
1	27,245	38,72	19,35	8,71
2	27,268	38,63	19,29	8,75
3	27,275	38,64	19,43	8,82
4	27,245	38,65	19,20	8,80
5	27,28	38,63	19,35	8,83
6	27,328	38,70	19,32	8,77
7	27,324	38,67	19,34	8,75
8	27,263	38,65	19,24	8,70
9	27,246	38,62	19,38	8,85
10	27,264	38,64	19,40	8,83
Valor medio	27,274	38,655	19,330	8,781
Incertidumbre	0,030	0,032	0,071	0,053

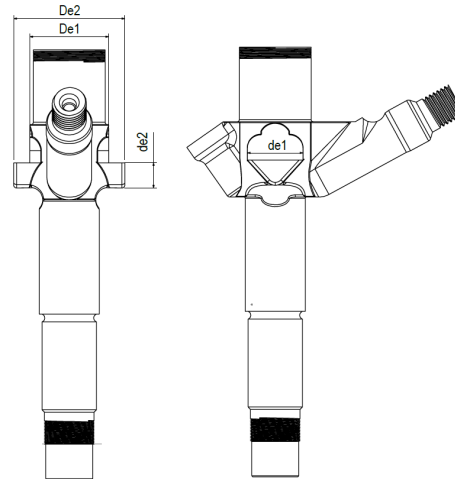


Figura 16. Esquema del cuerpo del inyector

El método de silicona se validó comparando cuatro dimensiones internas de la boquilla del inyector (Tabla 7). Las dimensiones de la boquilla se midieron con el proyector de perfiles y un microscopio (Fig. 17), lo que permite realizar el esquema tridimensional del molde de silicona (Fig. 18). Estas dimensiones también se midieron por rayos X (Fig. 19 y 20), que es un método más preciso y, en consecuencia, puede tomarse como referencia para calcular el error de medición (Tabla 7).

Tabla 7. Medidas en la boquilla empleando método silicona y rayos X

	Método Silicona	Rayos X	Error relativo (%)
Diametro orificio salida	0,146 ± 0,003	0,14697	0,0666
Ángulo interno	59,26 ± 0,16	59,30	0,0725
Diametro punta	3,914 ± 0,005	4,01702	2,5745
Diametro interno	3,889 ± 0,004	4,00027	2,7716

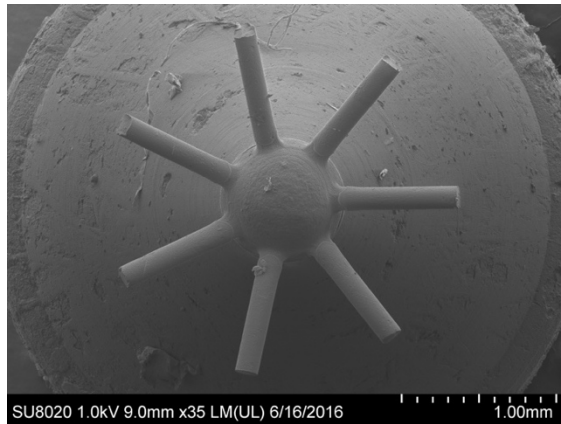


Figura 17. Molde silicona de la boquilla en microscopio



Figura 18. Modelo 3D del molde de silicona de la boquilla del inyector obtenido vía Solidworks

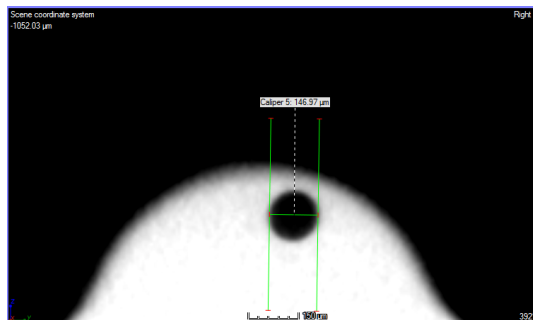


Figura 19. Orificio de salida de la boquilla medido por rayos X.

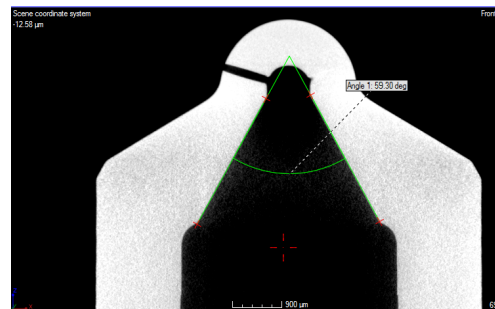


Figura 20. Cavidad interna de la boquilla medida por rayos X.

Después de modelar todos los componentes del inyector en el software CAD, se pueden ensamblar para obtener el modelo geométrico del inyector de orificio y cualquier vista de corte. La Figura 21 muestra una foto real de un componente del inyector, así como el modelo realizado en Solidworks.



Figura 21. Modelo 3D de Solidworks del inyector y vista seccionada.

CONCLUSIONES

El modelo obtenido está destinado a proporcionar los datos geométricos necesarios para futuros trabajos relacionados con la simulación numérica del proceso de inyección de combustibles alternativos. La nueva metodología probada es el método de la silicona, que se desarrolló inicialmente para caracterizar geométricamente la boquilla del inyector. Se aplica esta metodología a otras partes del inyector con buenos resultados. La precisión de la metodología de la silicona se probó comparándola con las mediciones obtenidas de las pruebas de rayos X y se concluye que es altamente fiable con un error $< 3 \%$.

CAPÍTULO 3: ESTUDIO Y CARACTERIZACIÓN DE COMBUSTIBLES OBTENIDOS A PARTIR DE REVALORIZACION DE RESIDUOS NO RENOVABLES

Como se ha comentado en la introducción general de la presente tesis, una solución para reducir el vertido de plásticos es someterlos a un proceso de pirólisis con el objetivo de obtener un combustible alternativo para su uso en motores térmicos.

La pirolisis es un proceso de degradación química causada por el calentamiento a altas temperaturas en ausencia de oxígeno. Mediante dicho proceso se obtiene un residuo carbonoso (char), aceite (liquid) y gas. Son muchos los factores a tener en cuenta a la hora de realizar la degradación del plástico, como son: temperatura de rotura de las cadenas del plástico sólido, empleo (pirolisis catalítica) o no de catalizador (pirolisis térmica), tiempo de residencia, etc.

En este capítulo se han estudiado en primer lugar los productos de varios procesos de pirolisis térmica y catalítica, caracterizándolos en base a algunas de sus propiedades físico-químicas y comparando los resultados con aquellos que implementan las normativas vigentes (Sección 3.1). A continuación, basándonos en la caracterización geométrica y mecánica expuesta en el capítulo 2, se ha realizado una simulación del proceso de inyección de combustible para estudiar el fenómeno de la cavitación (Sección 3.2). Por último, se ha realizado un estudio adicional para dar una salida viable al producto de algunos procesos de pirólisis que no resultan óptimos para motores alternativos de combustión interna (Sección 3.3).

SECCIÓN 3.1: Pirólisis catalítica de plásticos residuales para la producción de aceites líquidos usando zeolita ZAP USY como catalizador.

INTRODUCCIÓN

El objetivo principal del estudio fue la producción mediante **pirólisis térmica** de aceites útiles a partir de los siguientes tipos de residuos plásticos: Polietileno de Alta Densidad (2-HDPE), Polietileno de Baja Densidad (4-LDPE), Polipropileno (5-PP) y Poliestireno (6-PS), que presentan la mayoría de los residuos plásticos producidos a nivel mundial. Las zeolitas son uno de los catalizadores más empleados en los procesos de pirólisis y su influencia en los mismos es significativa. Por ende, con el objetivo de obtener una mejor calidad y composición de los aceites de pirólisis, también se realizó la **pirólisis catalítica** utilizando zeolita ZAP USY con una baja relación $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$. La baja relación $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ indica una mayor acidez de la zeolita utilizada, como reflejan varios autores en trabajos previos como [87,88]. La acidez del catalizador disminuye la energía de activación [89] y acelera la reacción de descomposición, lo que aumenta el potencial de la reacción secundaria.

De esta forma, otros objetivos del presente artículo eran probar, utilizando la zeolita mencionada con elevada acidez, si ésta podría minimizar la cantidad

de residuo sólido, disminuir la energía de activación de la reacción, aumentar la formación de hidrocarburos de cadena corta por sobre craqueo como se demuestra en el trabajo de [87] e influir en la composición de los aceites de pirólisis.

Los aceites de pirólisis obtenidos se analizaron a fondo mediante diferentes métodos de prueba y se compararon con combustibles como gasóleo y gasolina de acuerdo con las normas EN 590 y EN 228, respectivamente.

MATERIALES Y MÉTODOS

Materia prima y catalizador

Los plásticos utilizados en el presente estudio (HDPE, LDPE, PP y PS) se recolectaron de los vertederos municipales. El plástico recogido se clasificó según cada tipo de plástico (2,4,5 y 6 respectivamente) y se lavó antes de cortarlo en trozos de aproximadamente 1×2 cm. Se introducen 100 g de plástico en el reactor.

Durante la pirólisis catalítica, la relación de masa de plástico/catalizador fue 10/1. El catalizador utilizado en dicha pirólisis fue zeolita ZAP USY, producida por SILKEM d.o.o. Las principales propiedades de la zeolita empleada y otras zeolitas de uso común por muchos investigadores se presentan en la Tabla 8.

Tabla 8: Propiedades catalizadores

Catalizador	SiO ₂ /Al ₂ O ₃ (mol/mol)	BET (m ² /g)	Na ₂ O (wt %)	Volumen de poros (cm ³ /g)	Refs.
USY	15	550	0,05	0,1	[90]
HZSM-5	22,2	341	-	0,18	[91]
ZSM-5	24,1	319,4	-	0,23	
N-HZSM-5	28	429	-	0,168	[92]
HZSM-5	34	390	-	0,18	
ZAP USY	13	540	0,13	0,09	Artículo publicado

Proceso de pirólisis

En el presente trabajo, la pirólisis se llevó a cabo en un reactor a escala de laboratorio con lecho fijo. La representación esquemática del montaje experimental se muestra en la Figura 22. El reactor está hecho de acero inoxidable y la fuente de calor que lo alimenta es una estufa de gas de 3300 W. El reactor se aísla térmicamente con una camisa de lana de vidrio. Se inserta un termopar tipo K en la cámara de combustión para monitorear la temperatura durante el proceso.

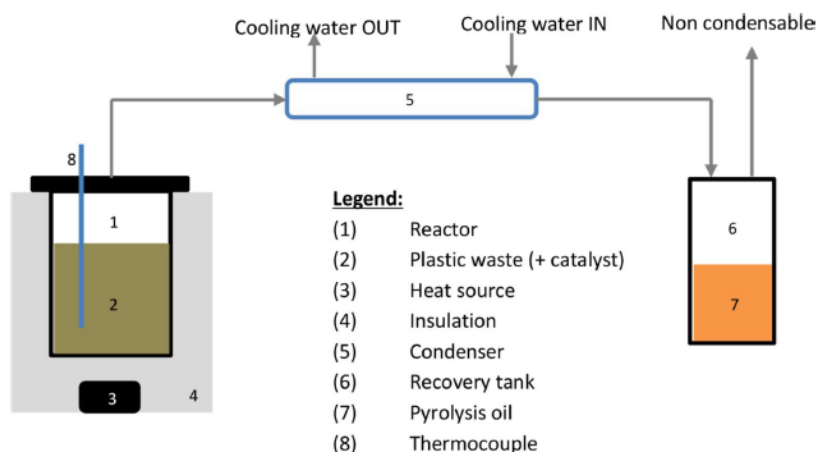


Figura 22: Esquema de la instalación

Utilizando un conversor de señal analógica a digital, DAQ WLS-9163 de National Instruments, y un módulo NI-9219 para la adquisición de datos de temperatura, se creó en el programa LabVIEW la aplicación necesaria para el seguimiento del proceso de pirólisis.

Como se ha comentado en la introducción de la presente sección, al comienzo de cada experimento, se corta el plástico en trozos más pequeños de aproximadamente 2 cm². Se pesan 100 g de plástico y se introducen en el reactor. Si se utiliza catalizador, se pesan 10 g de zeolita y se mezclan con el plástico antes de agregarlo al reactor. El reactor se selló y se conectó al condensador mediante tubos de cobre.

La temperatura dentro del reactor se elevó desde la ambiental hasta los 400 °C ± 30 °C. Los vapores del plástico (producto de pirólisis) fluían a través del condensador, a contracorriente, que se enfriaba con agua del grifo. De esta forma, el condensado (aceite de pirólisis) se recogió en un tanque de recuperación de aceite, mientras que los gases no condensables se liberaron a la atmósfera sin más análisis. El proceso de pirólisis se detuvo cuando el intervalo de tiempo entre las gotas de aceite en tres gotas consecutivas aumentó por encima de 10 segundos. El producto sólido (char) permaneció en el reactor y se eliminó después del enfriamiento del mismo. Los aceites de pirólisis obtenidos se caracterizaron en base a los equipos mostrados a continuación.

Equipos empleados.

La densidad de los aceites de pirólisis se determinó mediante un densímetro portátil, Mettler Toledo Density2Go, en un rango de temperaturas de 15 a 40 °C.

El mismo rango de temperaturas se utilizó para determinar la tensión superficial de los aceites pirolíticos, que se midió con el mismo tensiómetro EasyDyne K20 con el que se obtuvo la tensión superficial de las mezclas del capítulo 1.

El poder calorífico se determinó utilizando la bomba calorimétrica 6050 diseñada por Parr Company.

Mediante el empleo de viscosímetros introducidos en un baño y observando el tiempo que tarda el combustible en pasar de un engrase a otro, podremos obtener el valor de viscosidad dinámica del combustible. Para comprobar que cumple con la norma [35], donde se da el valor de la viscosidad cinemática, tendremos que emplear el dato de la densidad previamente obtenido.

Se utilizó un analizador TruSpec Micro de LECO para determinar la composición elemental (carbono (% C), hidrógeno (% H), nitrógeno (% N) y azufre (% S)) de los aceites pirolíticos.

La distribución del número de carbonos de los aceites de pirólisis se determinó utilizando un analizador Thermo Quadrupole GC-MS Modelo DSQ II-Trace Ultra GC. El análisis del espectro completo para cada muestra se encuentra en el artículo correspondiente (Anexo 3.1).

Los espectros ATR FT-IR se registraron en un espectrómetro Perkin Elmer Spectrum GX. El accesorio ATR (suministrado por Specac Ltd, Reino Unido) incluía un cristal de diamante. Se registraron un total de 16 escaneos para cada muestra, con una resolución de 4 cm^{-1} a temperatura ambiente. Los espectros de los aceites de pirólisis se registraron en el rango de números de onda entre 4000 y 650 cm^{-1} .

RESULTADOS

El propio aceite obtenido mediante pirólisis y el residuo sólido tras el proceso (Tabla 9) se determinaron pesando la masa de cada producto obtenido y dividiéndola por la masa total de plástico utilizada. Dado que la fase gaseosa no se recogió, su masa se calculó a partir de la diferencia entre la masa total de plástico utilizada (100 g) y la masa de aceite más la de residuo sólido obtenido. Se asume que el catalizador utilizado no se evapora y permanece en el residuo sólido. Por tanto, su masa se sustrajo de la masa total del residuo que quedaba en la cámara de combustión.

La última línea de la Tabla 9 presenta los resultados de reducción de tiempo cuando se utilizó el catalizador durante el proceso de pirólisis. Los resultados muestran una reducción significativa en el tiempo de pirólisis catalítica en comparación con la pirólisis térmica. La mayor reducción en el tiempo de reacción, 34,3 %, se obtuvo cuando se mezcló el catalizador y el plástico PP, seguido del plástico LDPE, HDPE y por último el plástico PS con una reducción del tiempo del 12,3 %. A partir de esto, podemos concluir que el uso de zeolita ZAP USY como catalizador en el proceso de pirólisis reduce la energía de activación requerida para todos los tipos de plástico probados. El uso de un catalizador también aumenta la tasa de conversión de volátiles, lo que da como resultado menos residuos sólidos.

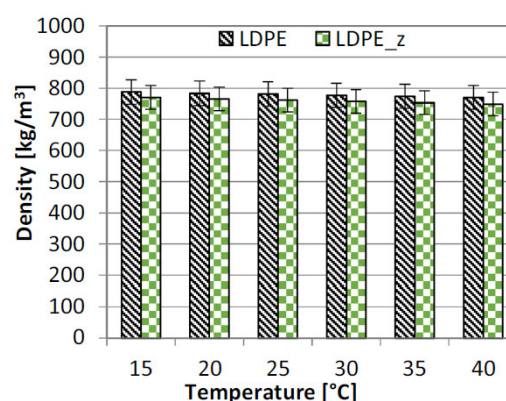
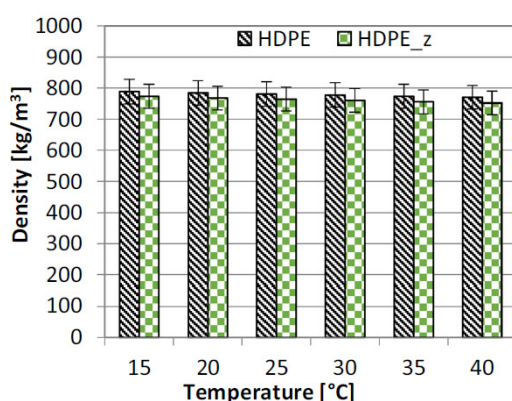
Tabla 9: Productos de pirólisis

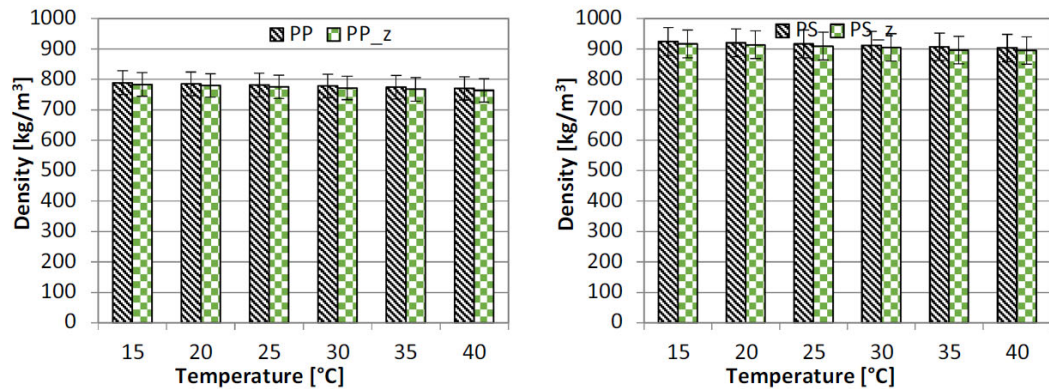
	HDPE	HDPE+z	LDPE	LDPE+z	PP	PP+z	PS	PS+z
Líquido (%)	76,9	62,7	75,1	65,5	80,6	59,9	58,6	81,5
Sólido (%)	14,2	4,5	15,8	2,7	11,5	5,4	22,6	10,2
Gas (%)	8,9	32,8	9,1	31,8	7,9	34,7	18,9	8,3
Reducción tiempo (%)		25,7		30,8		34,3		12,3

La **densidad** es particularmente importante en los motores de encendido por compresión con sistemas de inyección controlados mecánicamente. Si se retrasa el inicio de la inyección, lo que puede ocurrir con una densidad de combustible más baja, el inicio de la combustión puede retrasarse. Esto provoca una tasa de combustión más lenta, un retraso de encendido más corto, una presión más alta y una temperatura más alta en la cámara de combustión [36], dando como resultado una menor potencia nominal del motor. Si aumenta la densidad del combustible, se puede adelantar la sincronización de la inyección, obteniendo una combustión más rápida, un mayor retraso en el encendido y una menor presión y temperatura en la cámara de combustión [93], lo cual interesa de cara a la reducción de emisiones contaminantes y al aumento de la potencia nominal del motor. Los resultados de densidad obtenidos para los distintos aceites pirolíticos se pueden consultar en la Tabla 10 y se han graficado en las Figuras 23.

Tabla 10: Características de los aceites pirolíticos obtenidos y valores de normativas

Tipo de plástico	Densidad a 15 °C (kg/m ³)	Viscosidad a 40 °C (mm ² /s)	PCS (MJ/kg)
HDPE	788,40	2,08	45,00
HDPE + z	773,30	1,47	44,40
LDPE	787,40	1,96	46,02
LDPE + z	770,10	1,24	43,15
PP	789,00	2,00	44,38
PP + z	783,40	1,47	43,49
PS	924,30	1,03	40,93
PS + z	916,80	1,05	40,14
EN 590	820-845	2,4-4	43,4
EN 228	720-775	-	44,4

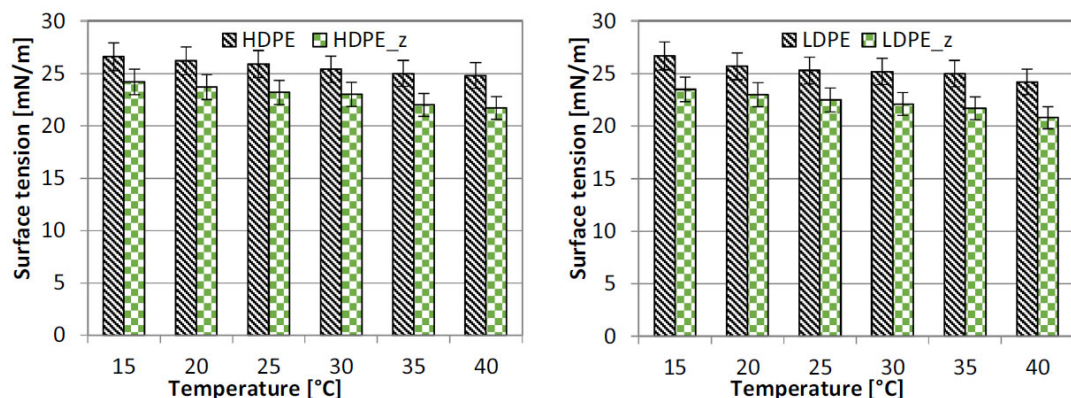


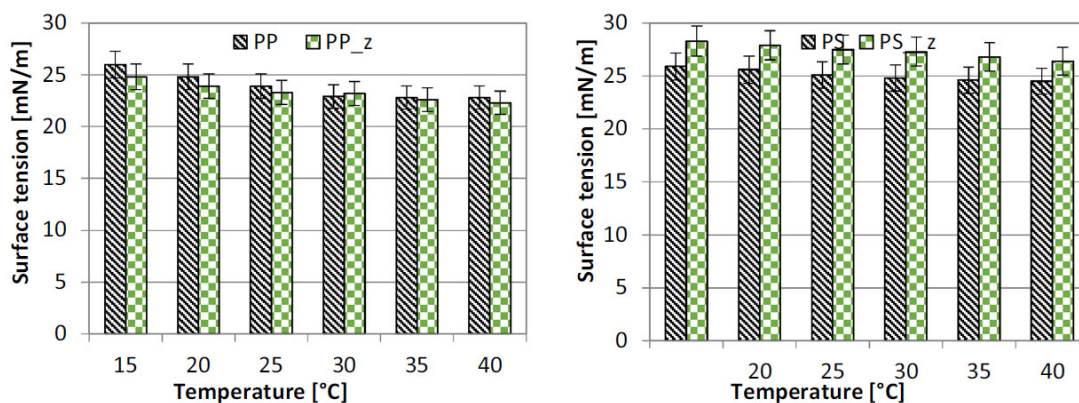


Figuras 23: Densidades de los aceites pirolíticos a distintas temperaturas

La **tensión superficial** tiene un efecto importante en la pulverización del chorro de combustible. Cuando aumenta la tensión superficial, pueden aumentar las fuerzas internas en el combustible, lo que aumenta aún más la longitud de la pulverización y disminuye el ángulo del chorro inyectado. Una mayor tensión superficial del combustible aumenta el diámetro medio de Sauter de las gotas de aspersión, lo que ralentiza su descomposición y evaporación [94]. Los resultados de tensión superficial obtenidos para todos los aceites de pirólisis a diferentes temperaturas se han graficado en las Figuras 24. Estos resultados están en consonancia con los valores de tensión superficial para el gasoil obtenidos por otros investigadores [95], o son ligeramente inferiores a ellos.

Los resultados de la tensión superficial del aceite pirolítico dependen en gran medida de la temperatura de la medición. Como se puede observar en las Figuras 24, a medida que aumenta la temperatura del aceite, su tensión superficial disminuye. El uso de catalizador provocó una disminución de la tensión superficial de los aceites obtenidos a partir de residuos plásticos de HDPE, LDPE y PP, mientras que aumentó la tensión superficial del obtenido a partir de residuos plásticos de PS.





Figuras 24: Tensión superficial de los aceites pirolíticos a distintas temperaturas

El **poder calorífico superior** (Calorific Value, CV) de los combustibles determina la cantidad de energía que se libera cuando se quema un kilogramo de combustible. Los valores más altos conducen a una mayor liberación de calor y viceversa. La Figura 25 muestra los resultados del poder calorífico superior de los aceites pirolíticos obtenidos, los cuales están tabulados en la Tabla 10.

Los resultados muestran que todos los aceites de pirólisis tienen un poder calorífico alto, comparable al del gasóleo (42,8 – 43,4 MJ/kg) y la gasolina (44,4 MJ/kg) [96]. Al comparar los resultados para la pirólisis térmica, el mayor poder calorífico del aceite de pirólisis, 46 MJ/kg, se obtuvo para los residuos plásticos de LDPE, seguido del aceite de pirólisis de HDPE con un CV de 45 MJ/kg. Los aceites de pirólisis catalítica tenían CV ligeramente más bajos. El mayor CV en pirólisis catalítica se obtuvo al utilizar plástico HDPE, 44,4 MJ/kg, seguido del plástico PP con un CV de 43,5 MJ/kg y el plástico LDPE con un CV de 43,2 MJ/kg. El poder calorífico más bajo lo obtuvo el plástico PS en ambos tipos de pirólisis.

Los resultados obtenidos concuerdan bien con los de otros autores, donde se utilizó un catalizador y los mismos tipos de plástico. Kumaran et al. [97] produjeron aceite pirolítico a partir de varios tipos diferentes de desechos plásticos utilizando dolomita y zeolita como catalizadores. El poder calorífico de dichos aceites estuvo en el rango de 41,7– 44,2 MJ/kg.

Solo se utilizó plástico LDPE en el trabajo de Singh et al [98]. El aceite de pirólisis obtenido tenía un poder calorífico de 40,37 MJ/kg, que es ligeramente inferior al de nuestro estudio. El uso de plásticos PP y PE en pirólisis catalítica utilizando zeolita USY, con propiedades similares a nuestra zeolita, resultó en un CV de 45,8 MJ/kg para PP y 45,1 MJ/kg para PE en el trabajo de Kassargy et al. [90]

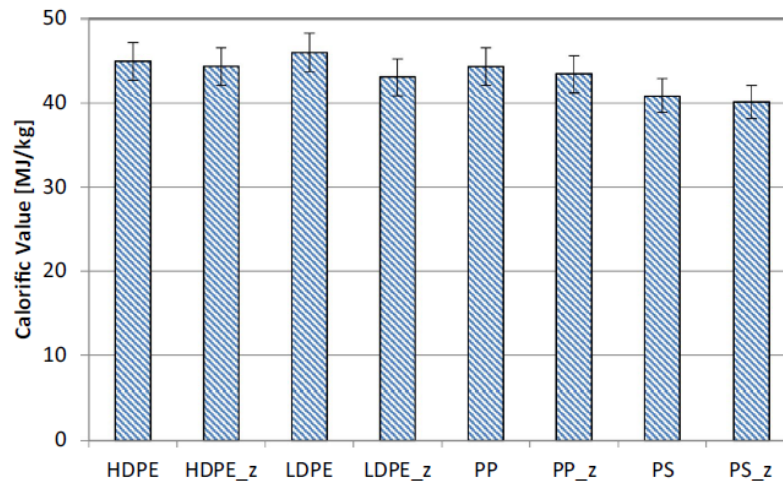
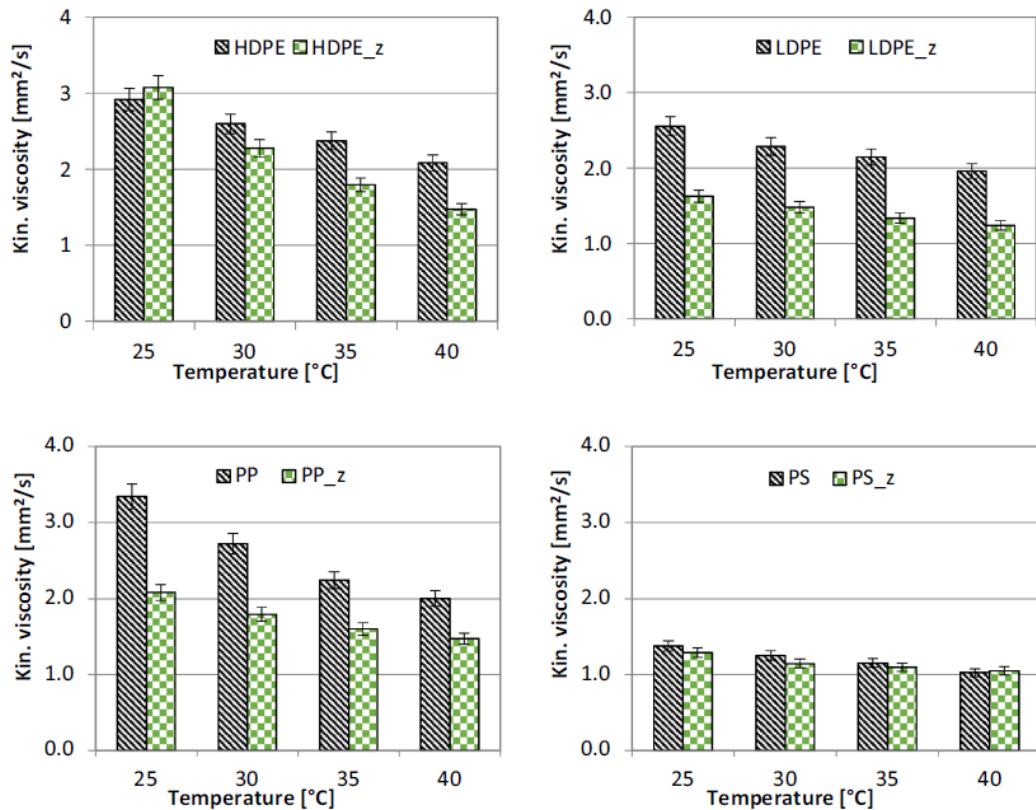


Figura 25: Poder calorífico de los aceites pirolíticos

La **viscosidad** del combustible también es un parámetro muy importante. Según [99], una mayor viscosidad del combustible da lugar a una tasa de inyección más baja, un retraso de encendido más largo y una menor velocidad de elevación de la aguja. Esto puede afectar negativamente a la potencia nominal del motor y a la formación de emisiones. Los cambios en la viscosidad del combustible también afectan a los parámetros de inyección y pulverización del mismo. Una mayor viscosidad del combustible da como resultado una mayor profundidad de penetración del tipo de rociado y un ángulo de cono de rociado más estrecho [100]. Los resultados de viscosidad cinemática para los aceites obtenidos se presentan en las Figuras 26 y se han tabulado en la Tabla 10. Los resultados muestran que, a medida que aumentó la temperatura de ensayo, disminuyó la viscosidad cinemática del aceite de pirólisis, lo que sigue el comportamiento normal del combustible.

Los resultados presentados corroboran que el uso del catalizador disminuye la viscosidad de la mayoría de los aceites de pirólisis obtenidos. Esto se puede atribuir a cambios en la composición del aceite durante la pirólisis catalítica que promueve la formación de moléculas de cadena corta, como se puede observar en las gráficas de porcentaje de área (Figs. 6 del artículo correspondiente a esta sección (Anexo 3.1) y Figura 27 de la presente tesis).

La Norma para el gasóleo, EN 590, especifica la viscosidad cinemática requerida del combustible, que debe estar en el rango de 2 a 4,5 mm²/s a 40 °C Kassargy et al. [88]. Según ellos, la pirólisis térmica de aceites plásticos HDPE, LDPE y PP cumplió con la viscosidad requerida para el gasoil, mientras que, en todos los demás casos, la viscosidad obtenida fue inferior a la requerida por la Norma. Una viscosidad más baja puede aumentar la tasa de inyección de combustible y acortar el retraso del encendido. Las viscosidades cinemáticas obtenidas fueron ligeramente más bajas que en el trabajo de Sing et al. [98], donde se utilizó plástico LDPE. Se obtuvieron viscosidades cinemáticas ligeramente más altas, en comparación con nuestros valores, en Santaweek et al. [101], donde se utilizaron los tipos de plástico LDPE, HDPE y PP, mientras que Kurniawati et al. [102] obtuvo el mismo valor de viscosidad cinemática cuando se utiliza plástico HDPE en el proceso de pirólisis térmica.



Figuras 26: Viscosidad cinemática de los aceites pirolíticos a distintas temperaturas

Para abordar el estudio de la calidad del aceite de pirólisis, se necesita información sobre la composición química, la cual afecta al poder calorífico, la formación de emisiones durante la combustión, etc. Dado que el contenido de nitrógeno y azufre en todos los aceites pirolíticos es casi insignificante (menos del 0,1 % N y menos del 0,5 % S), la atención se centró en la cantidad de C y H. Los resultados de la composición elemental del aceite de pirólisis se presentan en la Tabla 11.

A partir de los resultados presentados de la composición elemental, se puede concluir que el uso del catalizador conduce a una reducción en el contenido de carbono e hidrógeno en los aceites de pirólisis.

La relación C/H de todos los aceites de pirólisis de HDPE, LDPE y PP fue similar a la relación encontrada en los combustibles gasóleo y gasolina: 6,2–6,3, mientras que los aceites de pirólisis, tanto térmica como catalítica, producidos a partir de PS tenían una relación C/H superior a 10.

Los resultados también muestran que el carbono y el hidrógeno constituyen la mayor parte de la composición de los aceites de pirólisis. Dado que todos los plásticos contienen una cantidad considerable de aditivos, como plastificantes, retardantes de llama, estabilizadores, rellenos, refuerzos [103], asumimos que representan la diferencia hasta el 100 % de la composición de los mismos.

Tabla 11: Composición elemental de los aceites pirolíticos

	% C	% H	Relación C/H
HDPE	66,7	10,7	6,3
HDPE + z	52,1	8,3	6,3
LDPE	72,4	11,6	6,2
LDPE + z	54,0	8,6	6,3
PP	64,5	10,2	6,3
PP + z	53,0	8,1	6,5
PS	67,4	6,6	10,2
PS + z	54,8	5,3	10,3

Los resultados de la distribución del número de átomos de carbonos se muestran en la Fig. 6 del artículo publicado (Anexo 3.1). Como puede verse a partir del resumen de dichos resultados, Figura 27, los aceites obtenidos de la pirólisis térmica de residuos plásticos de HDPE, LDPE y PP contenían hidrocarburos con cadenas más largas y pesos moleculares más altos en comparación con los aceites obtenidos de la pirólisis catalítica de los mismos tipos de plásticos. Lo que va en consonancia con lo que ya sabíamos, los catalizadores ayudan al proceso de degradación.

El polietileno de alta densidad, obtenido mediante pirólisis térmica, contenía hidrocarburos con una amplia gama de números de carbono (6–36), con el mayor porcentaje de área de moléculas C19 (15,9 %), C16 (9,4 %) y C15 (8,4 %). La pirólisis catalítica del mismo plástico tuvo un rango más estrecho de distribución del número de carbonos (5-10) con una menor proporción de hidrocarburos superiores. El mayor porcentaje de área de aceite de pirólisis de HDPE+z se obtuvo en C8 (28,4 %), seguido de C7 (16,7 %) y C9 (15,7 %). La misma tendencia se obtuvo para el aceite de pirólisis LDPE con y sin zeolita.

Para el caso del PP producido mediante pirólisis térmica, el mayor % de área se obtuvo en C9 (17,3 %), seguido de C18 (14 %) y C13 (12,6 %); mientras que en la pirólisis catalítica, el mayor % de área se da para C9 (26,5 %), seguido de C8 (23,3 %) y C7 (12,7 %). Los aceites obtenidos con ambas pirólisis de residuos plásticos de PS contenían una distribución de número de carbono similar, con un porcentaje máximo de área en C8 (41,8 % para PS y 41,6 % para PS+z), seguido de C9 (20,1 % para PS y 17,1 % para PS+z) y C16 (8,1 % para PS y 8,8 % para PS+z).

Según [104], la distribución típica del número de carbonos de la gasolina está en el rango de C4 a C12 y de C12 a C24. Comparando estos valores con los resultados de los aceites de pirólisis obtenidos, se puede ver que los productos de una pirólisis térmica de residuos plásticos de HDPE, LDPE y PP producen aceites que tienen una distribución de número C similar al gasoil. Los aceites obtenidos de la pirólisis catalítica de PP, HDPE y LDPE, tienen una distribución del número de carbonos similar a la gasolina.

En el trabajo de [90], la zeolita USY, con una relación ligeramente más alta de $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ (menos ácido) en comparación con la nuestra, produjo una distribución similar del número de carbono de los aceites de pirólisis obtenidos a partir de plástico PE y PP. Comparando con los resultados, se puede ver que la

acidez ligeramente más baja de su zeolita resultó en la producción de moléculas de cadena más larga con un número C superior a 10. Esto muestra que la proporción más baja de $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ de la zeolita utilizada en la presente tesis promueve el agrietamiento del plástico provocando la rotura y ocasionando moléculas de cadena corta.

Los resultados presentados en la Figura 27 muestran que el uso del catalizador incrementa la tasa de degradación de los plásticos, resultando en una mayor proporción de moléculas de cadena corta hasta el número de carbonos C10. Esto queda reflejado por la fracción de área más alta para todos los plásticos en el caso de la pirólisis catalítica. El mayor aumento en la tasa de degradación se observó en el plástico HDPE, seguido de los plásticos LDPE y PP.

La mayor tasa de degradación y la mayor proporción de moléculas de cadena corta influyeron en la menor densidad del combustible, tensión superficial y viscosidad de los aceites de pirólisis catalítica presentados en las Figuras 23, 24 y 26 respectivamente.

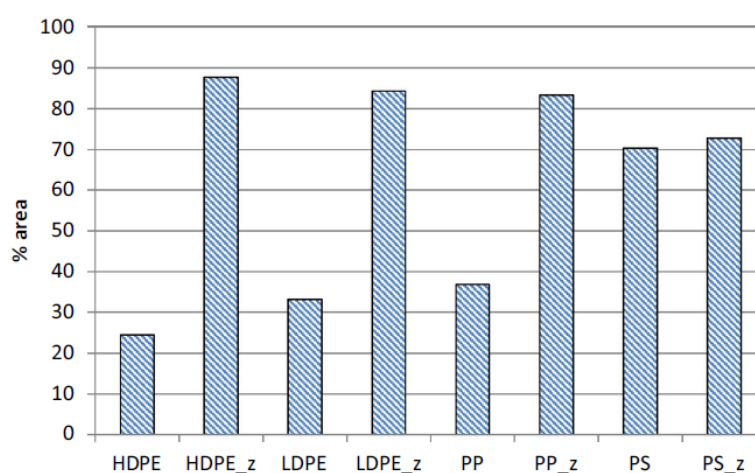


Figura 27: %área hasta C10

Los resultados de los espectros FT-IR para los aceites obtenidos durante la pirólisis térmica y catalítica se muestran en las Figuras 28 y 29, respectivamente. Se agregó el espectro del gasoil (D2) sin aditivos para una mejor comparación.

El espectro de gasoil (D2), aceites de pirólisis de plásticos HDPE, LDPE y PP con y sin el uso del catalizador mostró las señales típicas de los hidrocarburos alifáticos en el rango de 2.960 cm^{-1} a 2.850 cm^{-1} , a 1.460 cm^{-1} y a 1.375 cm^{-1} , respectivamente, debido a la presencia de los grupos funcionales $-\text{CH}_3$ (metilo) y $-\text{CH}_2$ (metileno).

Según los datos de la literatura [105], las olefinas en los espectros FT-IR muestran las siguientes señales típicas; una señal a 3.078 cm^{-1} atribuida al estiramiento antisimétrico de $-\text{CH}_2$; dos señales, una a 990 cm^{-1} y la otra a

aproximadamente 910 cm^{-1} , son típicas de un doble enlace monosustituido (R-CH=CH_2), una señal a 720 cm^{-1} representa un doble enlace disustituido en cis, y el pico a 965 cm^{-1} . Los picos típicos de olefina alrededor de 3.079 cm^{-1} , 1.643 cm^{-1} , 991 cm^{-1} y 910 cm^{-1} se observaron solo en los espectros de los aceites de pirólisis producidos térmicamente, Figura 28.

Podemos concluir que la zeolita ZAP USY tuvo algún efecto en la limitación de la formación de olefinas. La extensión =C-H en compuestos aromáticos se observa en $3.100 - 3.000\text{ cm}^{-1}$ y tiene una frecuencia ligeramente mayor que la extensión -C-H en los alcanos. Los hidrocarburos aromáticos muestran señales en los rangos de $1.600 - 1.585\text{ cm}^{-1}$ y $1.500 - 1.400\text{ cm}^{-1}$, que se deben a las vibraciones de estiramiento carbono-carbono en el anillo aromático. Estas señales se detectaron en el espectro del aceite de pirólisis correspondiente a PS, indicado en rojo en las Figuras 28 y 29.

A partir de los espectros ATR FT-IR, encontramos que los aceites de pirólisis catalítica de plásticos HDPE, LDP y PP produjeron principalmente parafinas (alcanos), mientras que los aceites de pirólisis térmica de estos plásticos también contenían una pequeña cantidad de olefinas (alquenos). La presencia de dobles enlaces en los alquenos influye en una mayor densidad, una mayor tensión superficial y una mayor viscosidad cinemática de los aceites de pirólisis de HDPE, LDPE y PP.

Por último, los aceites de pirólisis catalítica y térmica obtenidos a partir de plásticos PS consisten principalmente en hidrocarburos aromáticos.

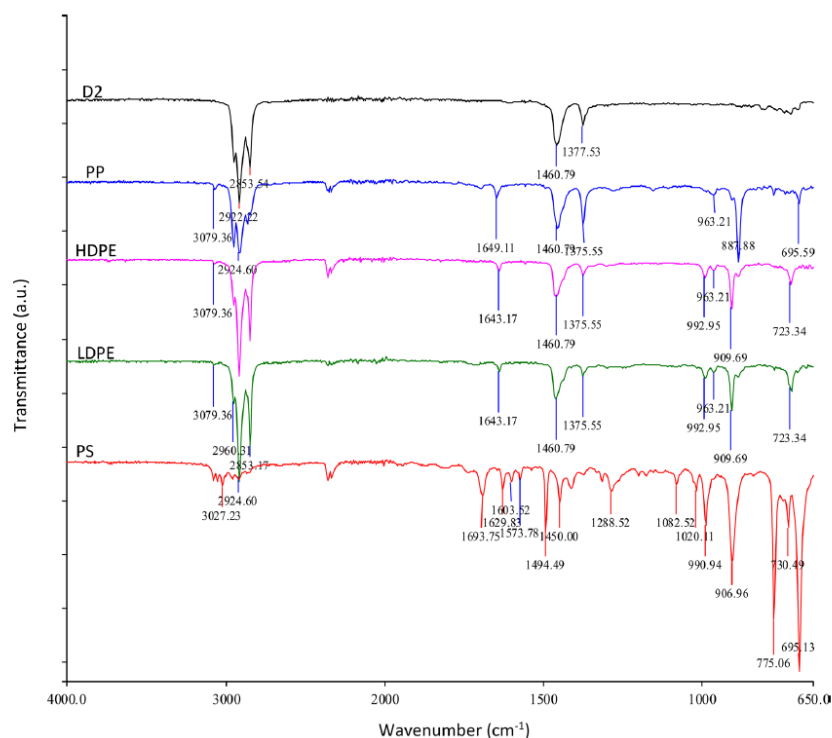


Figura 28: Espectro ATR FT-IR de aceites de pirólisis térmica y gasóleo convencional

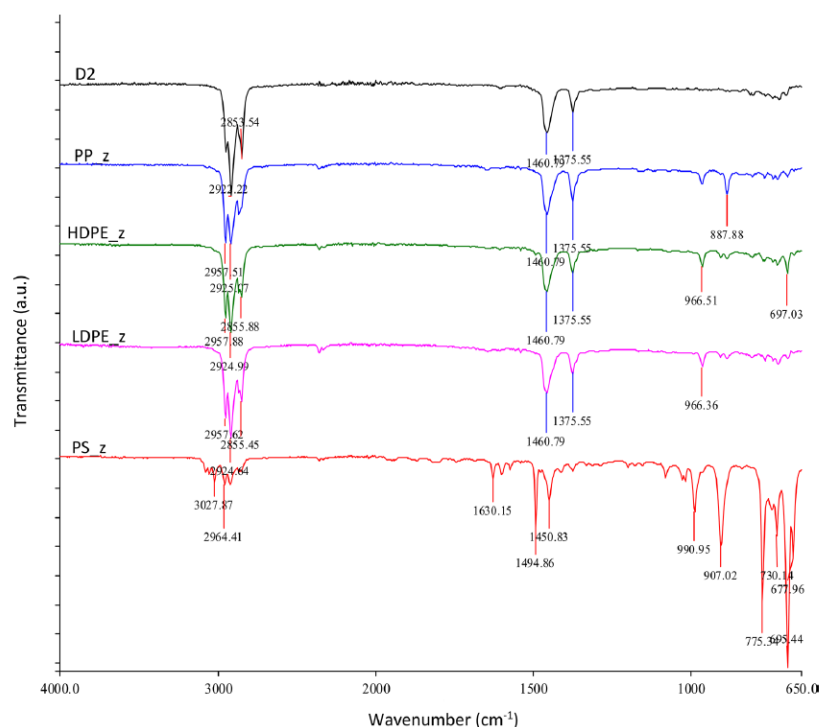


Figura 29: Espectro ATR FT-IR de aceites de pirólisis catalítica y gasóleo convencional

CONCLUSIONES

El trabajo presentado analiza la influencia de la zeolita ZAP USY en el rendimiento y la calidad de los aceites de pirólisis obtenidos a partir de residuos plásticos de HDPE, LDPE, PP y PS utilizando un reactor de pirólisis de lote único de lecho fijo a escala de laboratorio. Los resultados obtenidos indican que el uso de esta zeolita disminuye la energía de activación requerida de todos los residuos plásticos, lo que da lugar a una disminución de las cantidades de residuos sólidos y una mayor producción de gas. La zeolita utilizada también aumenta la tasa de degradación de los plásticos promoviendo así su descomposición, originando hidrocarburos con cadenas más cortas durante la pirólisis catalítica. El análisis de espectroscopia FT-IR muestra que la pirólisis catalítica produce aceites que consisten principalmente en alcanos, mientras que la pirólisis térmica también produce una pequeña cantidad de alquenos. Esto influye aún más en la composición y calidad de los aceites de pirólisis obtenidos.

No obstante, todos los aceites de pirólisis obtenidos tenían propiedades similares a la gasolina y al gasóleo, siendo aptos para su uso en motores de combustión interna como aditivo a los combustibles convencionales. Además, el empleo de aceites de pirólisis obtenidos a partir de residuos plásticos ayudaría a reducir el impacto ambiental al revalorizar la cantidad de dichos residuos enviados a los vertederos.

Como conclusión final y para servir de antecedente al desarrollo de las dos próximas secciones del presente capítulo, tras observar los resultados de los distintos plásticos utilizados como materia prima para el proceso de pirólisis se cree conveniente centrar el análisis del HDPE porque, junto con el LDPE:

- Posee valores de densidad ligeramente superiores lo que produce un retraso en el encendido, menor presión y temperatura en la cámara de combustión, dando lugar a un aumento de la potencia nominal, así como la reducción de emisiones al producirse una combustión más rápida.
- El poder calorífico superior es significativamente mayor en la muestra LDPE, sin embargo, con la presencia del catalizador, los valores de esta cantidad de energía que se libera son menores y finalmente resulta más alto el correspondiente al HDPE.
- Las señales del espectro FT-IR para estas muestras son típicas de hidrocarburos alifáticos, ya que este tipo de HC son los más idóneos para alimentar motores térmicos.

SECCIÓN 3.2: Efecto de los aceites pirolíticos HDPE y LDPE en la formación de cavitación en un inyector diésel common-rail

INTRODUCCIÓN

Uno de los objetivos de la presente tesis se centra en el estudio del fenómeno de la cavitación en la boquilla del inyector caracterizada en el capítulo 2. Las propiedades del combustible influyen en el proceso de inyección, la condición de flujo en la boquilla, la atomización del combustible, el proceso de combustión, etc. Por ende, el artículo expuesto en esta sección tiene como objetivo estudiar la influencia de las propiedades del aceite pirolítico en la formación del fenómeno de la cavitación en la boquilla del inyector common-rail mencionado. En primer lugar, los aceites pirolíticos se obtuvieron a partir de residuos de polietileno de alta y baja densidad utilizando un reactor de pirólisis. Posteriormente, los aceites fueron caracterizados e implementados en el programa computacional AVL FIRE para estudiar su influencia en la formación de cavitación en el orificio de salida de la boquilla de inyección.

Autores como [106] utilizaron residuos de polietileno de baja densidad (LDPE), polietileno de alta densidad (HDPE), polipropileno (PP) y poliestireno (PS) para producir combustibles derivados del plástico mediante un proceso de pirólisis. La viscosidad, la densidad y el punto de inflamación de los combustibles fueron más bajos que los del gasoil, mientras que el poder calorífico de los combustibles derivados del plástico estuvo en un rango similar. Estos autores llegaron a la conclusión de que las propiedades de los combustibles producidos se asemejaban con las del gasóleo en Uganda y podrían sustituirlo potencialmente.

Otros investigadores como [107] también usaron residuos de plástico PP, HDPE y LDPE para producir aceite derivado del plástico utilizando un reactor de pirólisis de lecho fijo por lotes. Tras la caracterización, observaron que las propiedades de los combustibles obtenidos estaban en el rango del gasóleo y concluyeron que la pirólisis de residuos plásticos presenta un método eficiente y limpio para el tratamiento de dichos residuos. Los resultados de la pirólisis catalítica [108] indican que algunos combustibles derivados del plástico (aceites) tienen propiedades muy similares al gasóleo, mientras que otros difieren ligeramente. Dado que las propiedades del aceite producido a partir de plásticos

PP tienen las características más similares a las del gasoil, utilizaron este aceite para producir una mezcla al 5, 10 y 15 % de PP con gasóleo y lo probaron en un motor diésel turboalimentado de 4 cilindros. Los resultados obtenidos indican que el uso de este aceite como sustituto del gasóleo conduce a aumentar la presión máxima alcanzada dentro del cilindro, a una mayor tasa de liberación de calor, a un mayor consumo específico efectivo de combustible, una mayor temperatura de los gases de escape, un mayor retardo de encendido y mayores emisiones de monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x) e hidrocarburos (HC).

Singh et al. [98] usaron plástico LDPE para producir aceite pirolítico en un reactor de lecho fijo y lo emplearon para hacer una mezcla al 20 % de dicho aceite con gasóleo convencional. Además, la mezcla hizo funcionar un motor diésel de aspiración natural de un solo cilindro, y los resultados obtenidos se compararon con gasoil y combustible puro derivado de pirólisis de plásticos. Estos resultados indican que el uso de aceite pirolítico tiene una influencia menor en la presión en el cilindro, pero disminuye la eficiencia térmica del freno motor, aumenta la temperatura de los gases de escape, las emisiones de CO, las emisiones de HC, las emisiones de NO_x y disminuye las emisiones de CO₂.

Como ya se ha observado en la sección anterior y se puede ver en la revisión de la literatura presentada, los desechos plásticos se pueden transformar en combustibles sintéticos con éxito a través de un proceso de pirólisis. Su uso en motores de combustión interna influye en el rendimiento del motor y en el proceso de formación de emisiones. Esto suele estar relacionado con la diferente composición química y propiedades físicas de los aceites pirolíticos en comparación con los combustibles convencionales. Es bien sabido que el rendimiento del motor diésel y el proceso de formación de emisiones también están relacionados con el desarrollo del chorro de combustible y el proceso de pulverización, que puede verse afectado por las condiciones del flujo de combustible en los inyectores [109,110]. Las condiciones de flujo de combustible dentro de la boquilla del inyector pueden verse influenciadas por la presión de inyección, que aumenta significativamente en los inyectores common-rail para obtener una combustión más eficiente y aumentar el rendimiento del motor [111].

Yu et al. [112] concluye que una mayor viscosidad del combustible conduce a una menor formación de cavitación dentro del inyector. El combustible con la viscosidad más alta tuvo la longitud de penetración de rociado más larga y el chorro de rociado más estrecho. Torrelli et al. [113] probó la influencia de las propiedades del combustible en el flujo de la boquilla interna en un inyector de cinco orificios. Llegaron a la conclusión de que las propiedades del combustible influyen en el rendimiento del inyector y la formación de cavitación dentro del mismo. Los fluidos menos viscosos tienen menor fricción, lo que da como resultado mayores velocidades de combustible e influye en su tasa de flujo másico a la misma presión. Jiang et al. [114] también encontraron que los combustibles con menor viscosidad son más propensos a formar cavitación en la boquilla del inyector.

Dado que la diferencia en las propiedades del combustible puede influir significativamente en las condiciones del flujo, en esta sección nos centramos en estudiar la influencia de las propiedades de los combustibles derivados del plástico (aceites pirolíticos) en las condiciones del flujo de combustible y el inicio de la cavitación en el inyector common-rail de la marca Denso caracterizado geométrica y mecánicamente en el capítulo 2 de la presente tesis.

El estudio se realizó utilizando el programa computacional 3D AVL FIRE, en el que se llevaron a cabo simulaciones transitorias, que consideran el movimiento completo de la aguja durante las inyecciones de combustible, utilizando el enfoque RANS (modelado de turbulencia para las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas por Reynolds). En primer lugar, los aceites pirolíticos se obtuvieron a partir de plásticos HDPE y LDPE utilizando un reactor discontinuo de lecho fijo en atmósfera de nitrógeno. Los aceites obtenidos se caracterizaron y sus propiedades se compararon con gasoil. Posteriormente, se implementaron en un programa computacional.

El modelo numérico fue validado en comparación con los resultados experimentales seleccionando la malla computacional apropiada. A continuación, se implementaron simulaciones numéricas utilizando diferentes mezclas de gasoil y aceites pirolíticos a una presión de inyección constante de 845 bar y una presión constante en el cilindro de 60 bar. El perfil de elevación de aguja fue el mismo para todos los combustibles. Los resultados obtenidos indican que las diferencias en las propiedades del combustible influyen en la formación de cavitación dentro del orificio de inyección y en la condición a la salida del mismo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se clasificaron los plásticos y se seleccionaron HDPE y LDPE para este estudio. La instalación para el proceso de pirólisis modificada se muestra en la Figura 30. Las condiciones de aislamiento y sellado del reactor, así como la fuente de calor que lo alimenta y la aplicación en LabVIEW para monitorear el proceso de pirólisis, son las descritas en la sección 3.1. Las novedades de esta instalación, representada esquemáticamente en la Figura 30, son el empleo de varios termopares tipo K para controlar la temperatura. Los termopares K1 y K2 se utilizan para registrar la temperatura de los vapores que salen al principio del proceso. La temperatura de pirólisis (400 °C) se registra a través del termopar (8). Además, antes de realizar cada prueba, se hace fluir nitrógeno a través del dispositivo para garantizar una atmósfera inerte durante el proceso.

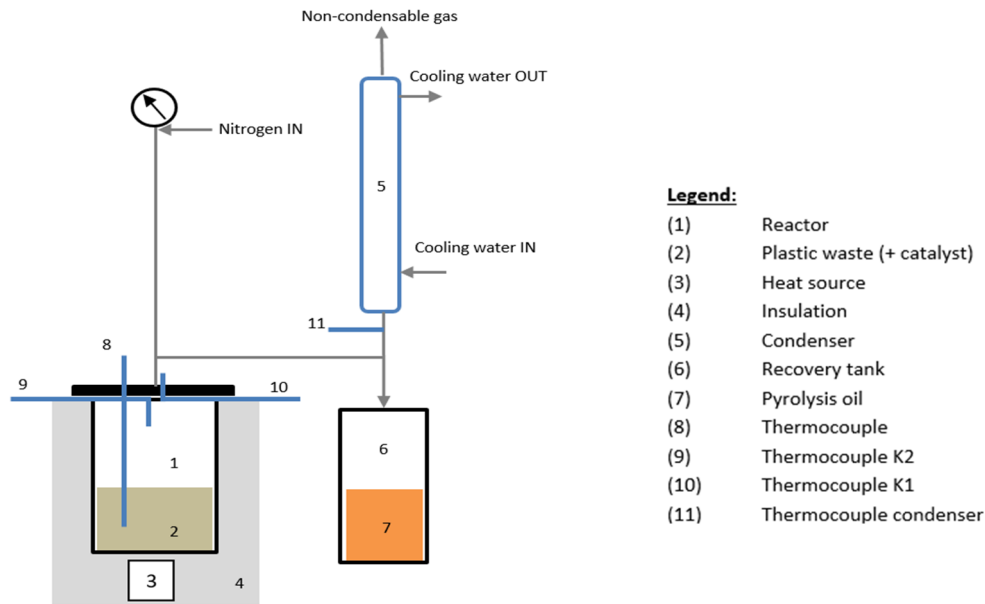


Figura 30. Instalación mejorada

Las propiedades de los aceites producto de pirólisis juegan un papel importante, como ya se ha comprobado en la sección anterior, a la hora de caracterizarlos. Si los combustibles deben ser aptos para motores de encendido por compresión en la Unión Europea, deben cumplir con la norma EN 590 para gasoil. Las propiedades de los aceites pirolíticos obtenidos a partir de plásticos HDPE y LDPE y las propiedades del gasóleo exigidas por normativa se presentan en la Tabla 12.

Tabla 12. Propiedades [88]

	Gasóleo (EN 590)	HDPE	LDPE
Densidad a 15 °C (kg/m ³)	820-845	770,40	775,40
Tensión superficial (mN/m)	26,80	23,20	23,00
Poder calorífico (MJ/kg)	42,8-43,4	46,43	46,54
Viscosidad cinemática (mm ² /s)	2,0-4,5	1,32	1,53
Índice de cetano	51,8	63,97	64,38
Composición elemental (%)	86,13 C	78,44 C	80,91 C
	13,87 H	13,40 H	13,53 H
	0 N	0,21 N	0,20 N
	0 O ₂	7,94 O ₂	5,35 O ₂

La Figura 31 presenta los resultados de la distribución del número de carbonos para los aceites pirolíticos obtenidos. Como puede observarse, dichos aceites consisten en hidrocarburos con números de carbono en el rango de C4 a C36, con la mayoría en el rango de C6 a C19. Esta distribución se asemeja a la del gasoil, que se encuentra en el rango de C8 a C23 [115].

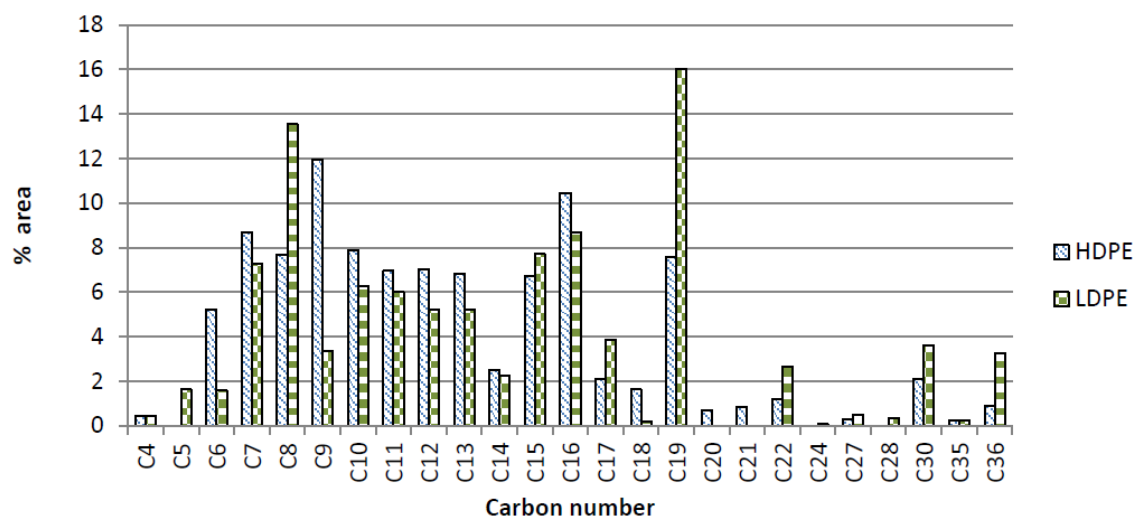


Figura 31. Distribución número de carbonos para HDPE y LDPE

En la Figura 32 se grafican los espectros de los aceites pirolíticos, así como el del gasóleo. Las señales corresponden a las de hidrocarburos alifáticos en el rango de 2.960 cm^{-1} - 2.850 cm^{-1} , a 1.460 cm^{-1} y a 1.375 cm^{-1} , respectivamente, las cuales se deben a la presencia de los grupos $-\text{CH}_3$ y $-\text{CH}_2$. Además de las señales anteriores, se observan con menor intensidad señales típicas de olefinas de los aceites de pirólisis de HDPE y LDPE, a 3.079 cm^{-1} , 1.643 cm^{-1} , 991 cm^{-1} y 909 cm^{-1} .

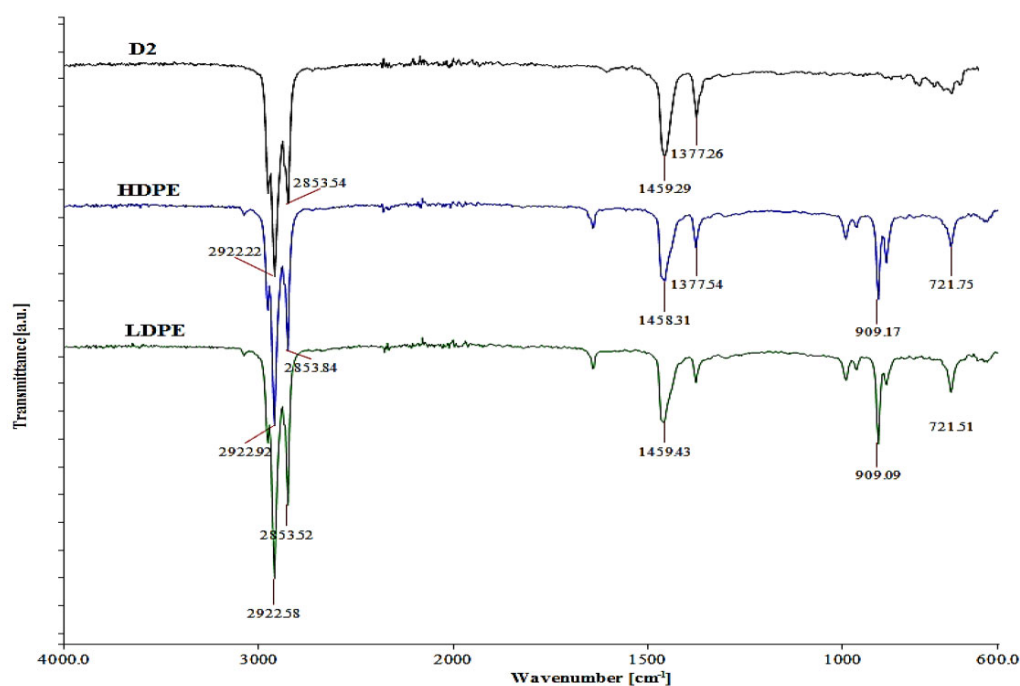


Figura 32. Espectros ATR FT-IR del gasóleo (D2) y los aceites de pirólisis de HDPE y LDPE

Propiedades de los combustibles para simulaciones

Las propiedades de las mezclas de combustible, que se reflejan en la Tabla 13, se calcularon a partir de las propiedades obtenidas de los aceites pirolíticos de HDPE y LDPE puros que se presentan en la Tabla 12. La Tabla 13 recoge las propiedades de los combustibles que se utilizaron en las simulaciones numéricas; que son: HDPE_50 (50 % gasoil + 50 % HDPE), HDPE_25 (75 % gasoil + 25 % HDPE) y HDPE_10 (90 % gasoil + 10 % HDPE), así como las mismas mezclas con igual nomenclatura para el aceite obtenido del LDPE. De acuerdo con [116,117], se observa una rápida caída de presión en la entrada del orificio de la boquilla. Debido a este hallazgo, la presión de saturación para todos los combustibles fue la misma.

Tabla 13. Propiedades de las mezclas empleadas en las simulaciones

	HDPE_50	LDPE_50	HDPE_25	LDPE_25	HDPE_10	LDPE_10
Densidad a 15 °C (kg/m ³)	800,20	802,70	815,10	816,35	824,04	824,54
Tensión superficial (mN/m)	25,00	24,90	25,90	25,85	26,44	26,42
Viscosidad cinemática (mm ² /s)	1,73	1,83	1,94	1,99	2,06	2,08

Sistema de inyección

En el trabajo desarrollado se utilizó un inyector diésel Denso, modelo 7H150 con válvula solenoide y siete orificios de inyección. Todos los orificios de inyección tenían la misma longitud de 0,76 mm y un diámetro de 0,15 mm. En trabajos previos del grupo de investigación con el que se ha trabajado [109] se presentó una descripción detallada del montaje experimental. Los regímenes de operación se obtuvieron durante las mediciones experimentales. El régimen de funcionamiento del motor seleccionado para este trabajo fue de 1.700 rpm, 110 N m de par motor, 845 bar de presión de inyección y 60 bar de contrapresión en el cilindro. El tiempo total de inyección fue de 1,26 ms.

Modelo numérico

El modelo numérico se hizo para un orificio de inyección (una séptima parte de todo el inyector). Se colocó volumen adicional (marcado con VOL en la Figura 33) en la salida de la boquilla de inyección. Este volumen se utiliza para la definición de la condición de contorno y evitar así definir esta condición en la salida del orificio de la boquilla. Según el proveedor del programa, obtenemos una inicialización física y resultados más realistas en la salida de la boquilla cuando usamos este método para la definición de la condición límite de la salida.

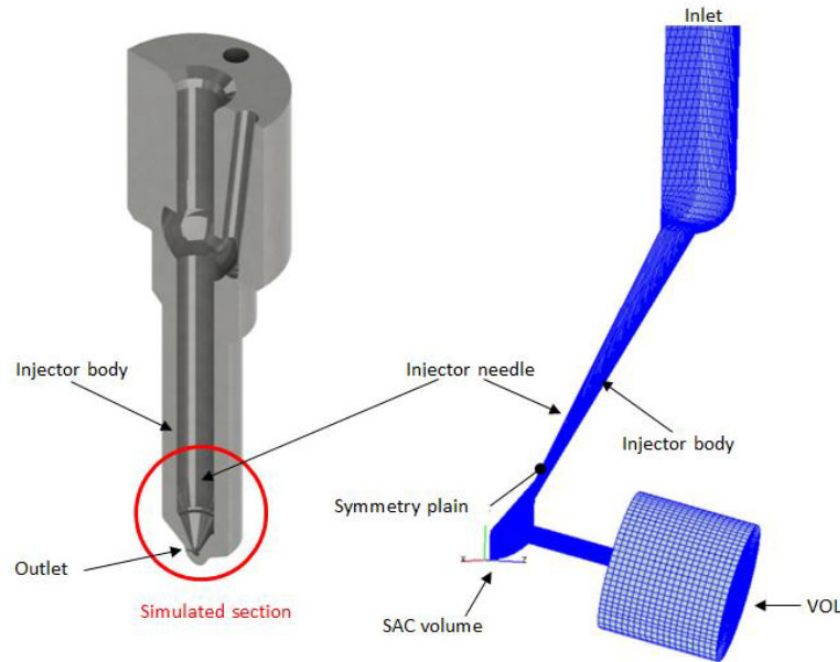


Figura 33. Sección transversal de la boquilla del inyector y malla computacional

Estudio de independencia de la malla

El estudio de independencia de malla se realizó con el fin de estimar el error numérico. Se utilizó el método de extrapolación de Richardson para determinar el índice de convergencia de cuadrícula (GCI), que proporciona una medida uniforme de convergencia para los estudios de refinamiento de cuadrícula y presenta una estimación del error de discretización [118,119].

La velocidad promedio del combustible y la energía cinética turbulenta (TKE) en la salida se determinaron en tres mallas con distintos números de elementos en cada una. El estudio se realizó con la aguja de inyección semiabierto. Los resultados del estudio de independencia de malla se presentan en la Tabla 14.

Tabla 14. Estudio de independencia de la malla

Malla	Nº elementos	Velocidad media a la salida (m/s)	Energía cinética turbulenta media a la salida (J/kg)
Gruesa	138.175	282,87	518,27
Media	358.996	287,38	801,83
Fina	1.582.816	257,46	856,25
GCI _{fino} (%)	-	4,26	0,541
GCI _{medio} (%)	-	1,23	9,06

Siguiendo los resultados del estudio de independencia de la malla, se utilizó la malla media con 358.996 elementos para trabajos posteriores. El refinamiento adicional de la malla proporciona resultados ligeramente mejores, pero aumenta significativamente el tiempo de cálculo.

Configuración de la simulación

El tiempo de simulación fue igual al tiempo total de inyección (1,26 ms) obtenido durante el trabajo experimental. Los intervalos de tiempo en la simulación fueron más pequeños al comienzo de la misma ($2,5 \cdot 10^{-8}$ s) y más grandes ($5,0 \cdot 10^{-8}$ s) al final de ella. Esta configuración proporcionó una buena convergencia durante toda la simulación. En la entrada se fijó la presión de inyección de 845 bar. La contrapresión en el cilindro de 60 bar se definió en el volumen (VOL) agregado al modelo numérico del inyector.

La condición de contorno de simetría se utilizó a ambos lados del cuerpo del inyector. Las propiedades de los combustibles probados se presentan en la Tabla 12 y se implementaron en el programa computacional. El movimiento transitorio de la aguja se definió durante la simulación según el trabajo [109] y fue el mismo para todos los combustibles. Este movimiento se divide en tres fases y se presenta en la Figura 34. La primera es la fase de apertura de la aguja (opening phase) que comienza con el inicio de la elevación de la aguja y finaliza a los 0,6 ms cuando la aguja está abierta en más del 95 %. Le sigue la fase abierta (open), cuando la aguja está a más del 95 % de la elevación total de la aguja. A los 0,74 ms comienza la fase de cierre (closing phase) y finaliza cuando la aguja baja por completo a los 1,26 ms.

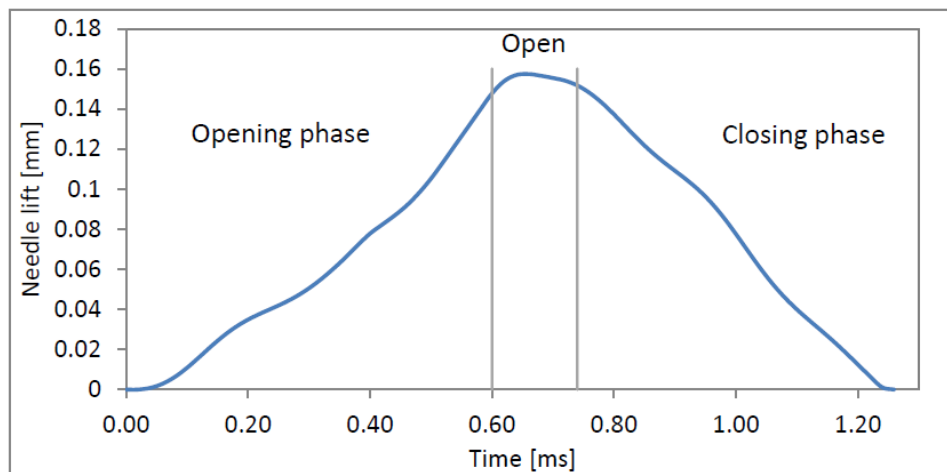


Figura 34. Movimiento de aguja

Al comienzo de la simulación, la aguja del modelo numérico no estaba completamente cerrada. Esto permitió evitar las celdas de espesor cero y determinar la malla computacional en todo el modelo. La distancia mínima entre el cuerpo del inyector y la aguja fue de 1 μ m.

Modelos matemáticos

Las simulaciones de flujo multifásico inestable dentro del inyector se realizaron utilizando el enfoque Euleriano-Euleriano. Se utilizó el enfoque del modelo de dos fluidos, que calcula todas las ecuaciones de conservación para cada fase y está integrado en el programa computacional AVL FIRE. Las ecuaciones de conservación de masa (ec.3), momento (ec.4) y energía (ec.5) se

consideraron durante el cálculo. Además de las ecuaciones de conservación, se utilizó un modelo de cavitación lineal para calcular el intercambio de masa (ec.7) y momento en la interfase. Los cambios de densidad del combustible con la presión se calcularon utilizando la ecuación de Tait (ec.6), mientras que el modelo de turbulencia se realizó utilizando un modelo turbulento k-ε estándar con tratamiento de pared híbrido, que es adecuado para todos los valores de y+, según las recomendaciones del programa utilizado para la simulación. Las ecuaciones se presentan en la Tabla 15.

Tabla 15. Ecuaciones modelo matemático

$\frac{\partial \alpha_k \rho_k}{\partial t} + \nabla \alpha_k \rho_k v_k = \sum_{l=1, l \neq k}^2 \Gamma_{kl}$	Masa (ec.3)
$\begin{aligned} \frac{\partial \alpha_k \rho_k v_k}{\partial t} + \nabla \alpha_k \rho_k v_k v_k \\ = -\alpha_k \nabla p + \nabla \cdot \alpha_k (\tau_k + \tau_k^t) + \alpha_k \rho_k g + v_k \sum_{l=1, l \neq k}^2 \Gamma_{kl} + \sum_{l=1, l \neq k}^2 M_{kl} \end{aligned}$	Momento (ec.4)
$\begin{aligned} \frac{\partial \alpha_k \rho_k h_k}{\partial t} + \nabla \alpha_k \rho_k v_k h_k = \nabla \alpha_k (q_k + q_k^t) + \alpha_k \rho_k q_k''' + \alpha_k \rho_k f \cdot v_k + \nabla \cdot \alpha_k (\tau_k + \tau_k^t) \cdot \\ v_k + \alpha_k \frac{\partial p}{\partial t} + \sum_{l=1, l \neq k}^2 H_{kl} + \sum_{l=1, l \neq k}^2 h_{kl} \Gamma_{kl} \end{aligned}$	Energía (ec.5)
$\rho_l = \rho_{ref} \sqrt[n]{\frac{p + B}{p_{ref} + B}}$	Tait (ec.6)
$\Gamma_{12} = \rho_d N''' 4\pi R^2 \dot{R} = \Gamma_{21}$	Intercambio masa en la interfase (ec.7)

RESULTADOS

Seguidamente, se presentan los resultados de la influencia de las propiedades del combustible en la inyección y en las condiciones de flujo de la boquilla en el inyector Denso 7H150. La masa total de combustible inyectado para todos los combustibles analizados se puede observar en la Figura 35.

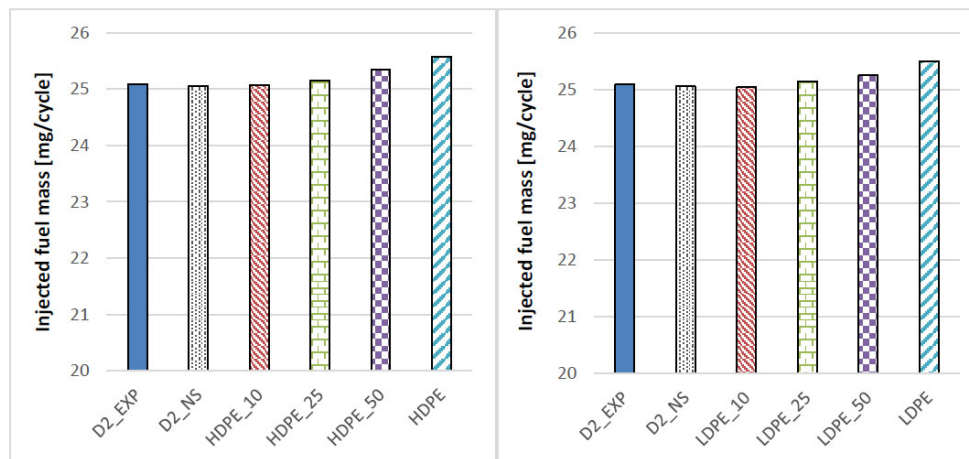


Figura 35. Comparación de la masa de combustible inyectado.

A partir de los resultados mostrados en la Figura 35, se observa que la simulación numérica (D2_NS) predice con precisión la masa total de combustible inyectado en un ciclo de inyección. La diferencia entre los resultados numéricos y los obtenidos experimentalmente para el gasóleo es inferior al 1 %. Los resultados también indican que la adición de combustible derivado del plástico al gasóleo influye en el aumento de la masa total de combustible inyectado.

Flujo en boquilla e inicio de cavitación

Cuando el combustible fluye a través de la boquilla de inyección, sufre cambios significativos que influyen en la velocidad y la presión del flujo local. El proceso de cavitación puede generarse tanto debajo de la aguja de inyección en los primeros instantes del levantamiento de la misma como en los momentos finales del cierre de la aguja, debido al espacio muy estrecho entre la aguja del inyector y el asiento de ella. Este espacio aumenta la velocidad del flujo de combustible y disminuye su presión, lo que induce la formación de cavitación. Además, otra posible zona propensa a la cavitación es a la salida del orificio de inyección, donde el combustible sufre cambios significativos en la dirección del flujo y además ocasiona una drástica caída de presión (casi al valor de 0 Pa de presión absoluta [120]). En el estudio presentado, nos centramos únicamente en estudiar la formación de cavitación en el orificio de inyección del inyector.

La Figura 36 muestra el momento en el que la cavitación está presente en el dominio de cálculo del orificio de la boquilla del inyector durante la inyección.

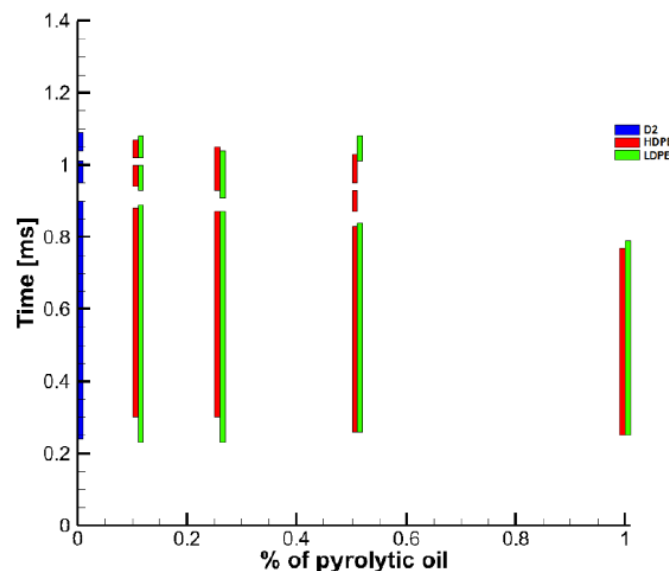


Figura 36. Aparición de cavitación en el orificio de inyección.

Como se puede ver en la Figura 36, la cavitación en el orificio de inyección comienza a formarse entre 0,25 y 0,30 ms después del comienzo de la inyección. Luego comienza a disiparse alrededor de 0,77 ms después del inicio de la inyección y, dependiendo del combustible utilizado, reaparece después de 1 ms del proceso de inyección. De los resultados presentados podemos ver claramente que la cavitación dentro de la boquilla de inyección fluctúa durante la fase de cierre del proceso de inyección.

Fase de apertura de la aguja

Las Figuras que se muestran a continuación presentan los resultados del desarrollo de la cavitación en un plano ubicado en el medio del orificio de inyección para la fase de apertura de la aguja. El plano de presentación está esquematizado en la esquina superior derecha de todas las figuras. Los resultados se presentan para intervalos de tiempo desde 0,3 ms hasta 0,64 ms de la fase de apertura de la aguja, con incrementos de tiempo de 0,02 ms. Antes de los 0,3 ms apenas había diferencia en los contornos de la cavitación, por lo que no se incluyen los resultados.

La transición de flujo sin cavitación a cavitación en la fase de apertura de la aguja para el gasóleo, aceite pirolítico HDPE y sus mezclas se presenta en la Figura 37.

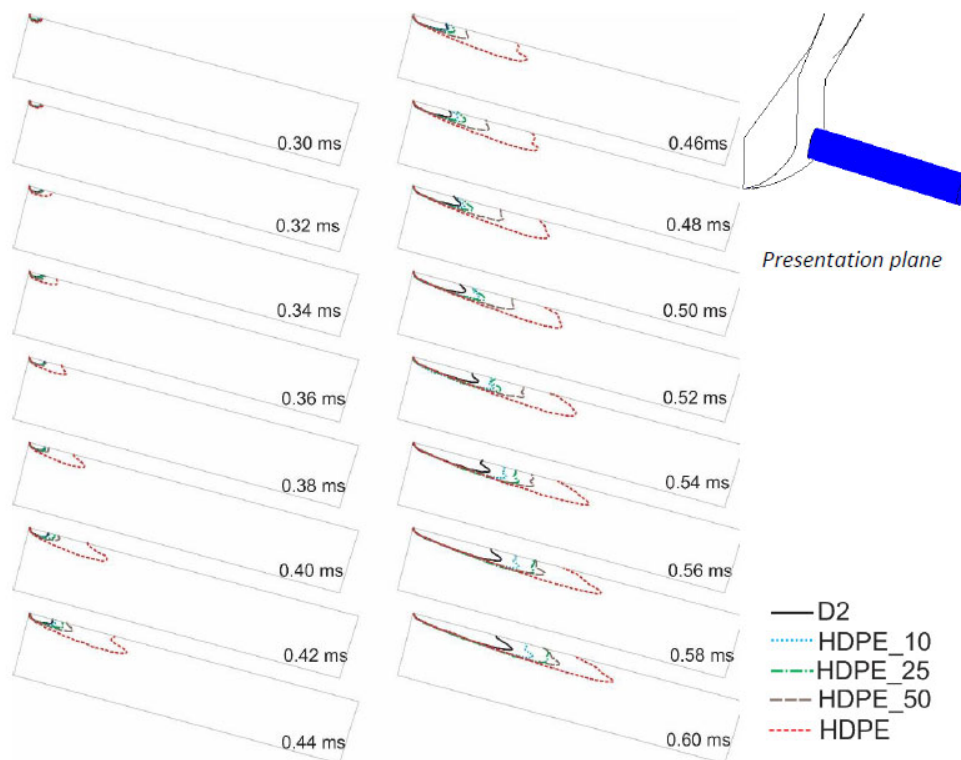


Figura 37. Contornos de desarrollo de cavitación para gasóleo, combustible HDPE y sus mezclas durante la fase de apertura de la aguja

A 0,30 y 0,32 ms, los contornos para todos los combustibles tienen la misma forma y longitud. A los 0,34 ms de tiempo de inyección, obtuvimos una rápida formación y dispersión de los contornos de cavitación para el aceite de HDPE, seguido de un crecimiento significativamente más lento para el HDPE_50, HDPE_25, HDPE_10 y gasoil. Dado que las condiciones de contorno en todas las simulaciones fueron las mismas, la diferencia en el desarrollo de la cavitación estuvo influenciada por las propiedades de cada combustible. El aceite pirolítico y sus mezclas tienen una viscosidad más baja en comparación con el gasóleo, lo que puede influir en una mayor velocidad del combustible debido a una menor fricción [113], mientras que una mayor viscosidad del gasoil

también influye en una formación más lenta del contorno de cavitación en la fase de apertura de la aguja. Esto provoca una formación y propagación más rápidas del desarrollo de cavitación de los combustibles alternativos analizados a través del orificio de inyección.

Los resultados del fenómeno de cavitación para el LDPE y sus mezclas con gasóleo, presentados en la Figura 38, muestran tendencias similares a los resultados para el HDPE.

Comparando las diferencias entre los aceites pirolíticos puros, podemos notar que la menor densidad y viscosidad del HDPE influye en la formación y propagación más rápidas de contornos de cavitación en esta etapa, hasta 0,50 ms. A partir de 0,52 ms no se aprecian diferencias en la longitud de los contornos para los aceites pirolíticos puros.

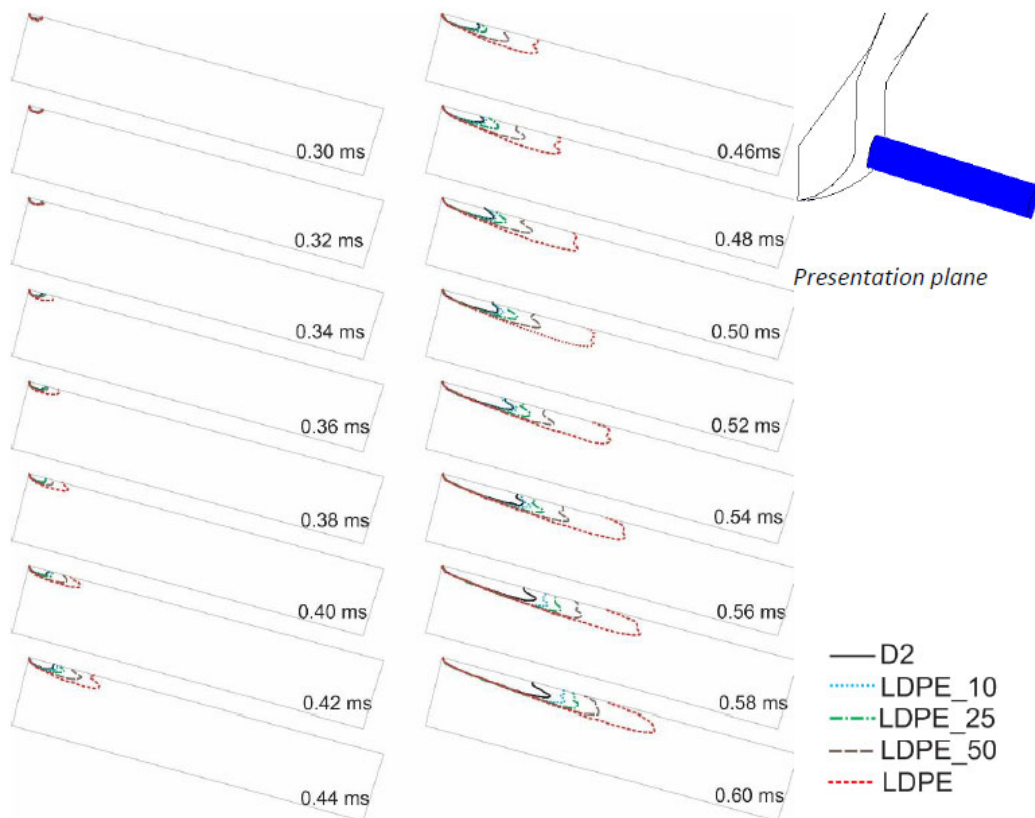


Figura 38. Contornos de desarrollo de cavitación para gasóleo, combustible LDPE y sus mezclas durante la fase de apertura de la aguja

Fase de aguja abierta

La fase de aguja abierta presenta el tiempo durante el proceso de inyección cuando la aguja está completamente abierta (más del 95% de la elevación máxima de la aguja). La Figura 39 presenta los contornos de las estructuras de cavitación en el orificio de la boquilla para los aceites pirolíticos de HDPE y LDPE y sus mezclas durante dicha fase.

Los resultados presentados en la Figura 39 indican que las estructuras de cavitación continúan formándose y extendiéndose a través del orificio de inyección en la fase de aguja abierta. Este fenómeno es más rápido para combustibles con menor densidad y viscosidad, lo que influye en el momento en que cada combustible obtiene la máxima longitud del contorno de cavitación. Esto ocurrió para el HDPE puro (Figura 39a) a los 0,70 ms después del inicio de la inyección, y para el aceite de LDPE puro a los 0,74 ms (Figura 39b). Las estructuras de cavitación para todas las demás mezclas de combustible pirolítico y para gasóleo puro continuaron creciendo y extendiéndose al final de la fase de aguja abierta.

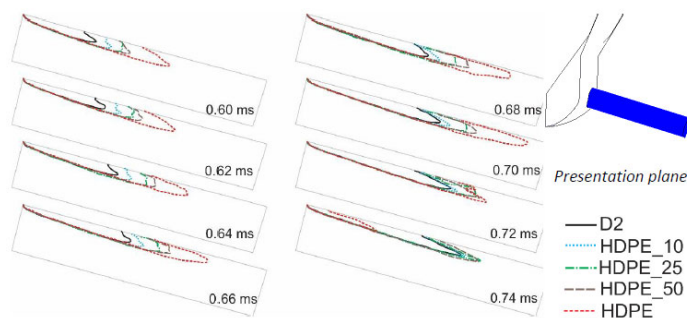


Figura 39 a). Contornos de desarrollo de cavitación para gasoil, HDPE y sus mezclas durante la fase de aguja abierta

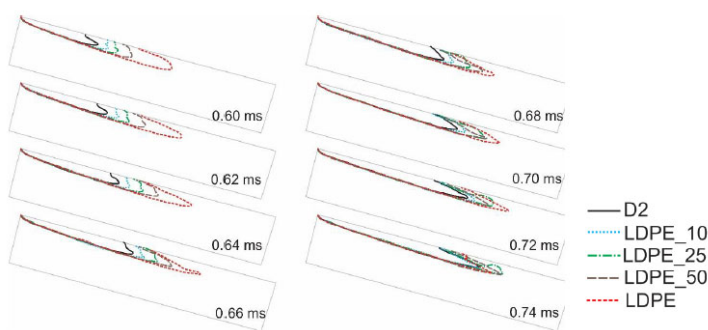


Figura 39 b). Contornos de desarrollo de cavitación para gasoil, LDPE y sus mezclas durante la fase de aguja abierta

Fase de cierre de la aguja

La última parte del proceso de inyección corresponde con la fase de cierre de la aguja. Los resultados de los contornos de las estructuras de cavitación en esta fase se presentan en las Figuras 40 y 41. Solo se presentan los resultados hasta 1,08 ms, ya que no hay cavitación visible después de este instante.

Durante la fase de cierre de la aguja, las estructuras de cavitación para el gasoil y las mezclas de combustible continuaron formándose y se extendieron a través del orificio de inyección hasta que alcanzaron la longitud máxima. Para la mezcla HDPE_50 esto ocurrió a los 0,76 ms, para la mezcla HDPE_25 a los 0,78 ms, a los 0,80 ms para la mezcla HDPE_10 y a los 0,82 ms para el gasóleo puro.

El crecimiento y la formación de la cavitación se asocia nuevamente con las diferencias en las propiedades de los combustibles, y es más rápido para las mezclas de combustibles que tienen menor densidad y viscosidad en comparación con el gasoil puro, lo cual está en línea con los resultados presentados en [121]. La longitud máxima también está influenciada por las propiedades del combustible. Los resultados indican que una mayor densidad y viscosidad del combustible aumentan la longitud de la estructura de cavitación, que fue la más larga para el gasóleo puro (Figura 40).

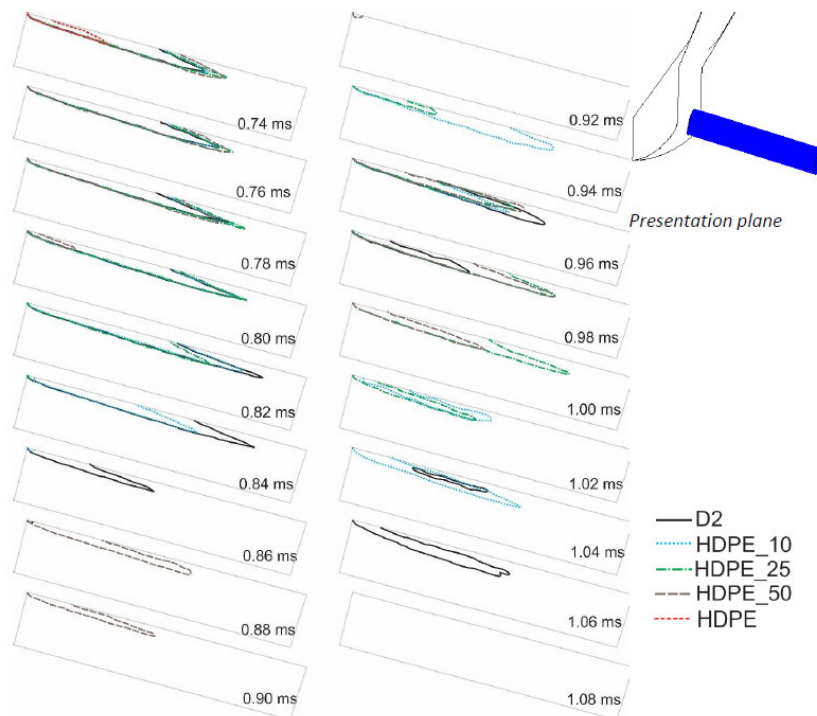


Figura 40. Contornos de desarrollo de cavitación para gasóleo, combustible HDPE y sus mezclas durante la fase de cierre de la aguja

Una vez que las estructuras de cavitación alcanzan sus longitudes máximas, comienzan a disiparse rápidamente hasta hacerlo por completo en aproximadamente 0,04 ms después de alcanzar los valores máximos. Para el gasoil puro, el colapso de la estructura de cavitación se produce en 0,06 ms después de la longitud máxima. A los 0,88 ms después del inicio de la inyección, las fluctuaciones de las estructuras de cavitación son visibles en el orificio de inyección en diferentes momentos del proceso para todas las mezclas de combustible y para el gasóleo puro, pero no para el aceite pirolítico HDPE puro (Figura 40).

Las mismas tendencias también se obtuvieron para el aceite pirolítico LDPE y sus mezclas con gasoil (Figura 41).

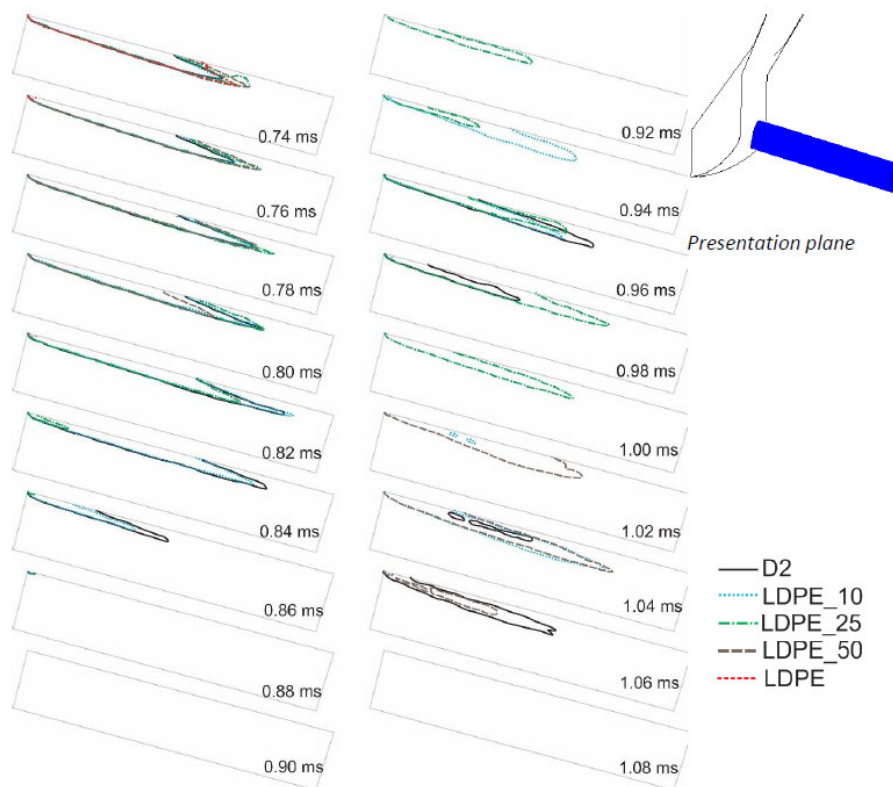


Figura 41. Contornos de desarrollo de cavitación para gasóleo, combustible LDPE y sus mezclas durante la fase de cierre de la aguja

Las estructuras de cavitación para la mezcla de combustible LDPE_50 alcanzó su longitud máxima a 0,76 ms, a 0,78 ms para LDPE_25 y a 0,82 ms tanto para LDPE_10 como para gasoil puro. Las estructuras más largas se obtuvieron para el gasoil puro y su mezcla con un 10 % de LDPE (LDPE_10), lo que nuevamente indicó que una mayor densidad y viscosidad del combustible aumentan la longitud máxima de dichas estructuras. La dissipación de las estructuras de cavitación se produjo de nuevo en 0,04 ms después de alcanzar su longitud máxima para el aceite pirolítico LDPE puro, y en 0,06 ms para el gasoil puro y sus mezclas con aceite LDPE.

A los 0,92 ms, la fluctuación de las estructuras de cavitación volvió a ser visible en el orificio de inyección en diferentes momentos del proceso para todos los combustibles ensayados, excepto para el LDPE puro (Figura 41). Las diferencias en las condiciones de flujo en el orificio de inyección durante la fase de cierre de la aguja para diferentes combustibles también se observaron en [116]. Los autores de este estudio concluyeron que el combustible con menor densidad y viscosidad responde más rápido al movimiento de la aguja (cierre). Asociaron este fenómeno a una menor resistencia del combustible a la perturbación si su viscosidad es menor. Dado que los aceites pirolíticos de HDPE

y LDPE tienen una viscosidad significativamente más baja en comparación con el gasoil, son menos resistentes a las perturbaciones en el flujo causadas por el cierre de la aguja, lo que creemos que no produce fluctuaciones de cavitación en la etapa final de la fase de cierre de la aguja.

Dado que las estructuras de cavitación están presentes durante más tiempo en la fase de cierre de la aguja cuando la densidad y la viscosidad del combustible son más altas debido a su aparición posterior, el flujo obstruido, causado por la nube de cavitación, todavía está presente en el orificio de inyección cuando el flujo de combustible comienza a disminuir debido al cierre de la aguja. El flujo obstruido puede provocar un aumento local de la velocidad del combustible, lo que puede influir aún más en el campo de presión dentro del orificio de la boquilla. Por lo tanto, los efectos combinados de la influencia de la densidad del combustible en la resistencia a la perturbación del cierre de la aguja y la posterior aparición de estructuras de cavitación en esta fase pueden influir en la cavitación de rebote. Esto puede verse como una fluctuación de las estructuras de cavitación cerca de las paredes del orificio de inyección. Este fenómeno se ve comúnmente en el colapso de burbujas cerca de la pared [122].

Salida del orificio de la boquilla

Las condiciones a la salida del orificio tienen una gran influencia en el desarrollo y la posterior pulverización de combustible. El cambio en los parámetros del flujo de combustible a la salida del orificio de la boquilla son el resultado de las condiciones del flujo aguas arriba y el inicio de la cavitación.

Las Figuras 42 y 43 presentan los valores del caudal másico, el valor promedio de la energía cinética turbulenta (AVR TKE), los valores máximos de la fracción de volumen de vapor de cavitación (MAX VVF) y los valores promedio de la velocidad normal, para HDPE y LDPE, respectivamente.

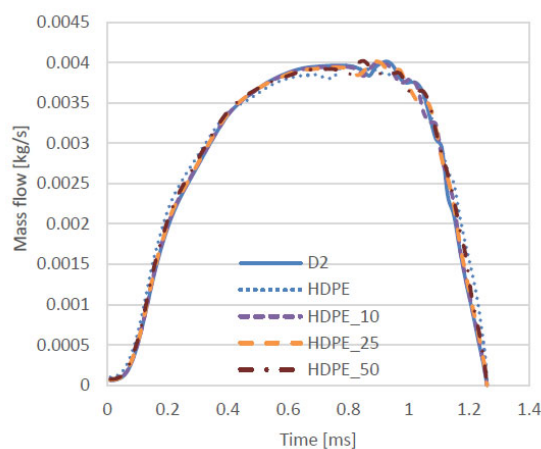


Figura 42 a) Caudal másico

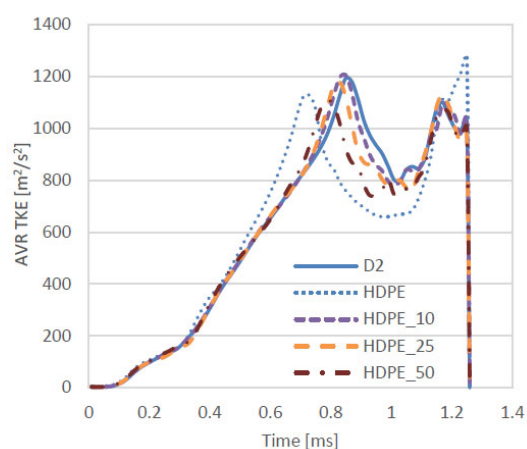


Figura 42 b) Valor medio de la energía cinética turbulenta del combustible

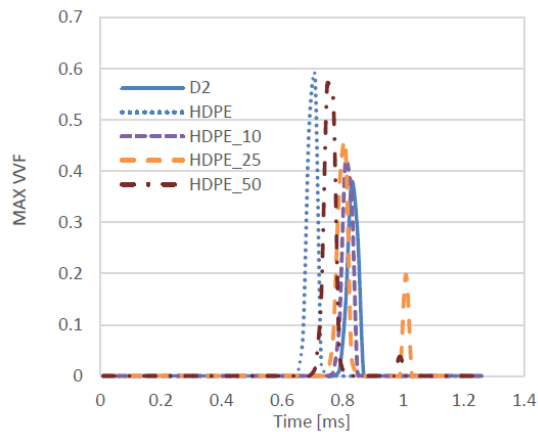


Figura 42 c) Valor máximo de la fracción de volumen de vapor

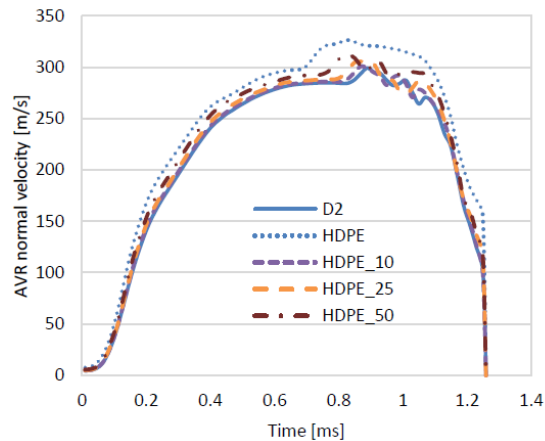


Figura 42 d) Velocidad normal promedio para combustible HDPE y sus mezclas

Los resultados para el flujo másico de gasoil, HDPE puro y sus mezclas con gasoil se presentan en la Figura 42a. Como podemos ver en los resultados, no hay una diferencia significativa entre ellos. En la fase de apertura de la aguja, el flujo másico para todos los combustibles aumenta sin fluctuaciones, además los flujos másicos para todos los combustibles son constantes sin fluctuaciones, excepto para el HDPE puro, donde comenzaron a ocurrir al final de la fase de aguja abierta. En la fase de cierre de la aguja, el caudal másico comenzó a disminuir. Las amplitudes de las fluctuaciones son las más altas para el gasoil puro, seguido de las mezclas de combustible y el HDPE puro.

Estas fluctuaciones en el caudal másico coinciden con la aparición de estructuras de cavitación en la salida del orificio de la boquilla (Figura 42 c). Dado que los valores máximos de VVF para el gasoil puro y la mezcla de combustible son menores en comparación con el HDPE puro (Figura 42 c), asumimos que las amplitudes de las fluctuaciones también dependen de las propiedades del combustible.

La fase de cavitación ocurre a la salida del orificio de la boquilla en diferentes momentos, dependiendo del combustible. Apareció primero para el HDPE puro, seguido de mezclas de combustible HDPE_50, HDPE 25, HDPE_10 y, al final, para el gasóleo puro. Los resultados coinciden con los de la formación de cavitación dentro del orificio de inyección, donde comenzó a formarse primero para combustibles con menor densidad y viscosidad.

Los resultados también muestran que los valores promedio de TKE de los combustibles aumentan cuando lo hacen las tasas de flujo másico, y que los picos de TKE promedio en la salida del orificio de la boquilla coinciden con el tiempo de aparición de las estructuras de cavitación. Esto indica que la formación y propagación de cavitación influyen en el aumento de TKE del combustible en la salida del orificio de la boquilla. La misma tendencia es evidente para la velocidad normal del combustible. Cuando ocurren estructuras de cavitación a la salida, se obtienen altas fluctuaciones en la velocidad normal de los combustibles. Los resultados también muestran que las velocidades para el

aceite de HDPE puro y sus mezclas son más altas que para el gasóleo puro. Esto se debe a la baja viscosidad del combustible alternativo y sus mezclas, que disminuyen la fricción del flujo de combustible. Este fenómeno también explica por qué no hay diferencias significativas en las tasas de flujo másico de los combustibles.

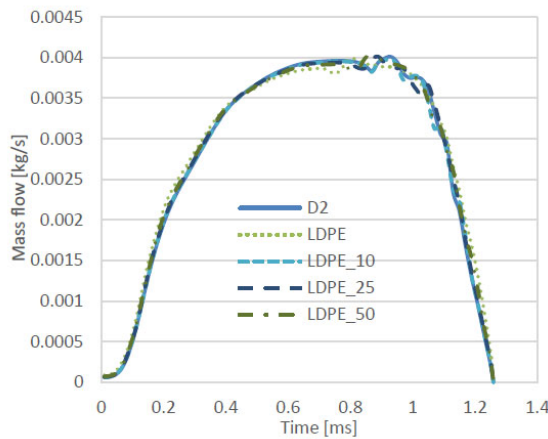


Figura 43 a) Caudal másico

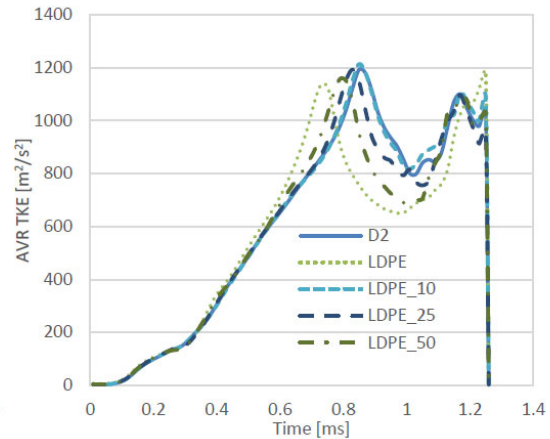


Figura 43 b) Valor medio de la energía cinética turbulenta del combustible

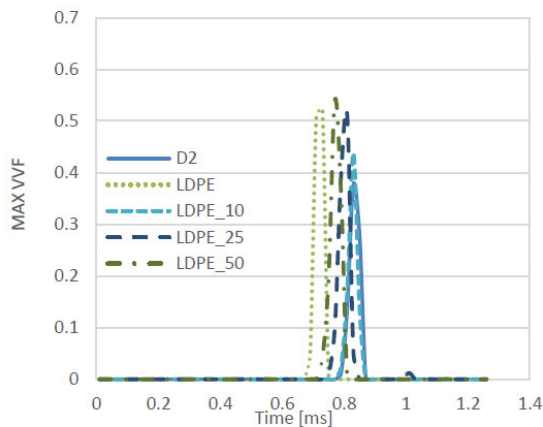


Figura 43 c) Valor máximo de la fracción de volumen de vapor

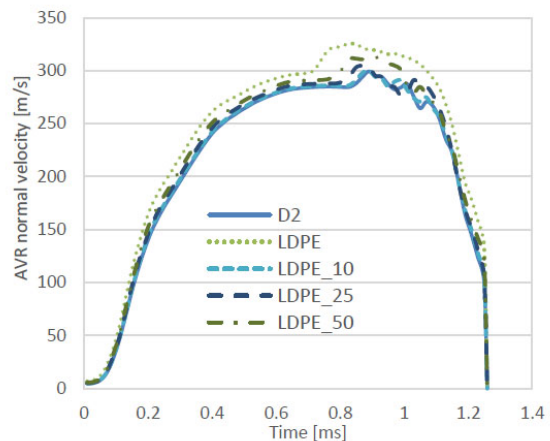


Figura 43 d) Velocidad normal promedio para combustible LDPE y sus mezclas

Las mismas tendencias también se observan para el LDPE y sus mezclas con gasóleo (Figura 43). Observando que los mismos valores se dan para el flujo másico, así como los valores máximos de velocidad normal promedio y TKE a la salida, que nuevamente coinciden con el tiempo de aparición de las estructuras de cavitación. La Figura 43c indica que la cavitación influye en las condiciones en la salida del orificio de inyección y puede afectar aún más en la atomización de combustible.

El momento en que ocurre la cavitación en la salida del orificio de inyección depende nuevamente del combustible y coincide con los resultados de la formación de cavitación dentro del orificio de inyección para cada combustible probado. Esto indica que una menor densidad y viscosidad del combustible no solo influye en la formación de cavitación dentro del orificio de inyección, sino

que también influye en la aparición de este fenómeno a la salida del orificio de la boquilla.

El segundo pico de TKE en la Figura 42b y la Figura 43b puede estar relacionado con el cierre de la aguja y la aparición tardía de estructuras de cavitación en la fase de cierre.

CONCLUSIONES

Tras analizar las propiedades de los combustibles obtenidos mediante pirólisis y sus mezclas con gasóleo, las principales conclusiones de la presente sección son:

- Los aceites pirolíticos obtenidos a partir de residuos de plástico HDPE y LDPE tienen propiedades similares al gasóleo convencional.

- La menor viscosidad de los aceites pirolíticos influye en una menor fricción del flujo a través de la boquilla, lo que origina una mayor velocidad del combustible y compensa la influencia de la menor densidad en la masa total del combustible inyectado.

- La menor densidad y viscosidad de los aceites pirolíticos influye en la formación y propagación más rápida de la cavitación dentro del orificio.

- Los combustibles con menor viscosidad y densidad aumentan la fracción de volumen de vapor producida por la cavitación a la salida del orificio de inyección y adelantan el tiempo de su aparición.

- Durante la fase de apertura de la aguja no hay diferencia significativa a la salida del orificio de la boquilla, independientemente de las propiedades del combustible.

- La menor viscosidad y densidad de los aceites pirolíticos puros influye en la menor presencia de cavitación en la fase de cierre de la aguja, menor resistencia a la perturbación y menor flujo obstruido, lo que resulta en un flujo sin fluctuación de cavitación.

- La mayor viscosidad y densidad del combustible influyen en la formación de cavitación de rebote cerca de las paredes del orificio de inyección.

Por tanto, podemos concluir que las propiedades del combustible tienen una influencia significativa en las condiciones de flujo y la formación de cavitación dentro del orificio de inyección de la boquilla y en su salida. Esto puede influir aún más en el proceso de pulverización, que es crucial para el rendimiento óptimo del motor de combustión.

Las estructuras de cavitación pueden aparecer en la salida del orificio de la boquilla al principio del proceso de inyección si se utilizan aceites pirolíticos. Pueden influir en la disminución más rápida del eje de pulverización, lo que

puede provocar la formación de una pulverización de combustible asimétrica y aumentar la posibilidad de colisión de la misma con otras paredes de la cámara de combustión. La aparición y fluctuación de la cavitación en la boquilla de inyección también influye en la erosión del orificio de inyección.

SECCIÓN 3.3: Aceite de pirólisis rápida a partir de residuos plásticos como combustible para centrales eléctricas de turbina de gas.

INTRODUCCIÓN

Como se ha observado a lo largo de todo el capítulo 3, el producto líquido obtenido tras los procesos de pirólisis apropiados, tiene propiedades similares a las de los combustibles convencionales y puede utilizarse en motores de combustión interna. Sin embargo, los parámetros que regulan el proceso de pirólisis (temperatura, tiempo de residencia, tasa de calentamiento, etc.) están directamente ligados a la cantidad de fracción líquida obtenida, la cual aumenta al aumentar el tiempo de residencia. Cuando se realiza una pirólisis rápida, la temperatura en la cámara de combustión es menor y la tasa de calentamiento es alta, resultando en un menor tiempo de residencia [123]. Esto repercute de forma negativa, a pesar de ser más económica, la calidad del aceite procedente de la pirólisis térmica rápida es peor debido a la longitud de sus cadenas de carbono (principalmente se compone de ceras C₂₁+) lo cual no puede considerarse una alternativa al combustible líquido para automoción a menos que se mejore [124].

Durante la estancia de investigación en la Universidad de Maribor se llevaron a cabo diversos procesos de pirólisis observando la mala calidad en aquellos en los que la tasa de calentamiento era elevada y el tiempo de residencia resultaba menor. Sin embargo, existen alternativas que no requieren combustibles de tan alta calidad. En la presente sección se analizan las principales propiedades de los aceites productos de dichas pirólisis rápidas y se comparan con las del fuelóleo pesado, conocido en inglés por sus siglas HFO (Heavy Fuel Oils) con el objetivo de demostrar que representan una alternativa factible para disminuir el impacto de los plásticos en el medio ambiente y obtener un combustible alternativo para alimentar una planta de producción de energía eléctrica mediante motores turbina de gas o de ciclo combinado.

El fuel oil se obtiene como un destilado o residuo del petróleo y está compuesto de cadenas largas de hidrocarburos (C₉-C₇₀), principalmente alcanos, cicloalcanos y aromáticos. Este tipo de combustible se clasifica del 1 al 6 siendo este último el correspondiente al HFO (pesado). Es el residuo del petróleo crudo tras la destilación de gasolina y su uso se basa en quemadores industriales, pudiendo alimentar centrales térmicas o motores robustos como los que se indican en [125,126].

La principal ventaja de emplear HFO como combustible es en primer lugar su menor coste [127], seguido de su alto poder calorífico que es similar al del gasóleo (39,57 MJ/kg para el HFO [128] y 42,03 MJ/kg para el gasóleo [129]). Sin

embargo, este combustible requiere un pretratamiento antes de la combustión, así como una limpieza frecuente de la turbina para evitar la pérdida de rendimiento [130].

Para estudiar la viabilidad de dicha cera producto de una pirólisis rápida, se producen aceites pirolíticos en la misma instalación que la de la sección 3.2, se analizan algunas de sus propiedades y se comparan con las del combustible empleado en este tipo de plantas. Además, se discute si es más apropiado utilizar un catalizador en la reacción de pirólisis o no ya que cambia la composición química del aceite.

Hay pocos artículos que traten sobre el uso de aceites de pirólisis rápida en turbinas de gas para la generación de energía, y la mayoría de ellos se centran en PO rápidos de biomasa en lugar de PO rápidos de residuos plásticos, como [131,132]. Dado que la materia prima utilizada en el proceso de pirólisis [133], así como el uso o no de un catalizador [134], influyen significativamente en las propiedades del PO resultante, se considera interesante determinar si las propiedades del PO, con y sin un catalizador, están dentro del rango de las propiedades del combustible de referencia (HFO), por lo que se puede proponer una alternativa realista.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se analizan dos muestras, una procedente de pirólisis térmica (HDPE) y otra como resultado de pirólisis catalítica (HDPE+Z). La instalación empleada para el proceso de obtención de dichos aceites es ilustrada en la Figura 30 y la zeolita corresponde a la de ensayos anteriores (Tabla 8). En el proceso catalítico se emplea la misma proporción plástico/catalizador que se ha comentado en secciones anteriores. La composición elemental del residuo plástico sólido es 0,23 %N, 87,23 %C, 13,67 %H y 0,03 % S, además el poder calorífico es de 46,14 MJ/kg.

Basándonos en estudios previos, la temperatura de la pirólisis térmica rápida del plástico HDPE se establece en $430\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 15\text{ }^{\circ}\text{C}$ [135]. Por otro lado, la temperatura de pirólisis catalítica rápida es ligeramente inferior, $400 \pm 15^{\circ}\text{C}$, ya que el uso de zeolita reduce la energía de activación [136].

RESULTADOS

En la Tabla 16, puede observarse el producto de la pirólisis térmica rápida para el HDPE, así como para el mismo tipo de residuo plástico sometido a pirólisis catalítica rápida. Al igual que en la sección 3.1, nuevamente observamos que el uso de catalizador disminuye la cantidad total de líquido obtenido. Es importante señalar que ambos productos líquidos resultaron ser cera, estaban en fase sólida, a temperatura ambiente.

Tabla 16. Productos de pirólisis térmica (HDPE) y catalítica (HDPE+Z) rápidas

	% Líquido	% Gas	% Sólido
HDPE	74,89	15,11	10
HDPE+Z	54,80	35,20	10

Los equipos empleados para la determinación de las propiedades físico-químicas de los productos de pirólisis son los mismos que se han comentado en las secciones anteriores.

En la Tabla 17 se recoge la información sobre composición elemental de ambas muestras obtenidas y el combustible de referencia, en este caso el HFO. Además de los datos de densidad a 15 °C y poder calorífico superior (PCS). Se observa que el porcentaje de carbono en la muestra de pirólisis térmica rápida es similar al HFO, siendo algo menor en la muestra obtenida mediante pirólisis catalítica rápida. Atendiendo a los resultados de densidad, ambos muestran valores significativamente inferiores en la comparativa con HFO. Con respecto al poder calorífico, se obtienen datos mayores, lo que mejora la calidad del combustible.

Tabla 17. Composición elemental y propiedades del combustible de referencia (HFO) y aceites pirolíticos obtenidos

	HFO		HDPE		HDPE + Z	
Composición elemental	%C	85,1	%C	85,5	%C	79,4
	%H	10,9	%H	13,1	%H	12,4
	%S	4,0	%S	0,09	%S	0,11
	%N	0,0	%N	0,22	%N	0,26
Densidad (kg/m ³)	970		770,4		778,7	
PCS (MJ/kg)	41,83		46,35		45,15	

El análisis del espectro completo sobre el número de carbonos se ha estudiado. En este caso se ha agrupado en base a distintos grupos: parafinas, olefinas, hidrocarburos aromáticos y no hidrocarburos (principalmente componentes oxigenados). En la Figura 44 se observa dicha clasificación.

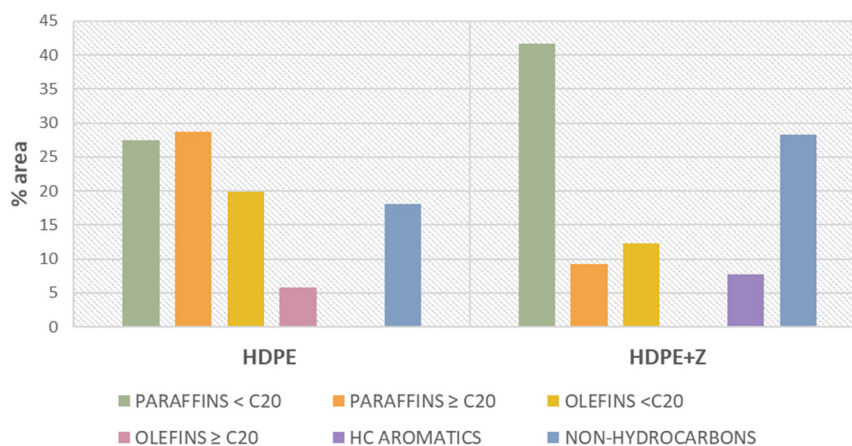


Figura 44. Distribución de los componentes líquidos a partir de pirólisis rápida (térmica y catalítica)

En el gráfico presentado, se observa que la muestra obtenida mediante pirolisis catalítica (HDPE+Z) contiene más de un 40 % de enlaces simples (parafinas) $< C_{20}$ siendo nula la presencia de dobles y triples enlaces (olefinas) $\geq C_{20}$. Además, dicha muestra posee 5 % de hidrocarburos aromáticos, de los cuales un 2,72 % son policíclicos, que son perjudiciales para la salud.

Por otro lado, centrándonos en la muestra producida a partir de pirólisis térmica (HDPE), es interesante comentar que se detecta mayor contenido de cadenas de carbono pesadas (parafinas y olefinas $\geq C_{20}$) y menor contenido de parafinas $< C_{20}$. Es importante resaltar la ausencia de hidrocarburos aromáticos y el menor porcentaje de compuestos no hidrocarburos.

Estos resultados están en consonancia con las conclusiones ya estudiadas, puesto que la zeolita ayuda al proceso de craqueo y degradación del plástico, resultando así en un porcentaje más alto de cadenas menos pesadas y en la nula presencia dobles y triples enlaces en las cadenas de carbono largas (olefinas $C \geq 20$) para la muestra HDPE+Z.

Los resultados obtenidos también reflejan que el producto de pirolisis térmica (HDPE) no contiene contaminantes metálicos dañinos para la turbina. Los no hidrocarburos distintos de los oxigenados en esta muestra representan menos del 1 % y están compuestos por N₂, F y Si. Sin embargo, la muestra de pirólisis catalítica (HDPE+Z) contiene más del 19 % de compuestos como N, Cl, Si, S y Br.

Para finalizar con los resultados, comentar que la ausencia de contaminantes metálicos y una cantidad significativamente menor de azufre son ventajas en comparación con los combustibles pesados como el HFO. Estos combustibles requieren un pretratamiento para eliminar los efectos de los componentes que resultan nocivos en la turbina de gas. Los contaminantes metálicos que intervienen en este proceso son principalmente sodio, potasio, calcio, plomo, vanadio y magnesio. A temperaturas elevadas, el vanadio, el sodio, el potasio y el plomo son corrosivos para los álabes de las turbinas. Estos materiales, junto con el calcio, pueden depositarse generando bloqueos y reduciendo la salida de gases. El grado de pretratamiento requerido, la inversión en el equipo y los costos de operación dependen de las propiedades físico-químicas del combustible [137].

CONCLUSIONES

Tras el análisis de ambos productos obtenidos mediante pirolisis rápida, se concluye afirmando que el mejor candidato para sustituir al HFO en su uso para plantas de ciclo combinado es el HDPE (producto de pirolisis térmica rápida) por las siguientes razones:

- No contiene hidrocarburos aromáticos y por tanto tampoco policíclicos, los cuales son perjudiciales para la salud.
- Se produce mayor cantidad de producto líquido, aunque de peor calidad debido a la presencia de cadenas de carbono con dobles y

triples enlaces $C \geq 20$, sin embargo, las propiedades de este producto se acercan más a las del HFO.

- No contiene metales pesados que son dañinos para las condiciones de operación de la turbina. Además, la presencia de no hidrocarburos diferentes de los oxigenados es de un 1%.
- No se detectan componentes clorados.
- La composición elemental del HDPE es más similar al HFO que la del HDPE+Z.

CAPÍTULO 4: ESTUDIO PRELIMINAR Y CARACTERIZACIÓN DE COMBUSTIBLES OBTENIDOS A PARTIR DE REVALORIZACIÓN DE RESIDUOS RENOVABLES

Como se comentó en la introducción general y justificación de la presente tesis, éste capítulo está dedicado al correcto secado de residuos biomásicos, con el objetivo a futuro de poder emplearlo como materia prima para la obtención de combustible alternativo mediante el proceso de pirólisis.

INTRODUCCIÓN

Los secaderos rotativos son equipos que se caracterizan por su alta capacidad para secar grandes cantidades de material húmedo en poco tiempo. Su desarrollo e investigación se remonta a la década de 1930 [138]. A lo largo de los años, las investigaciones se han basado principalmente en el diseño, modelado y control automatizado. El diseño y el modelado se basa en las ecuaciones de conservación de masa y energía, y parámetros generales para estudiar los fenómenos de transferencia de calor y masa y los tiempos de residencia [139,140]. Otro aspecto importante como es el movimiento de partículas a lo largo del tromel ha sido estudiado a partir del diseño de la geometría interna [141,142].

En cuanto al análisis energético en secaderos rotativos, el procedimiento generalmente se realiza a partir de modelos globales donde solo se consideran los parámetros de entrada y salida [143,144]. Las ecuaciones de transferencia de calor y masa se aplican para el sistema termodinámico de estado estacionario en toda la unidad [145,146]. En este sentido, los secaderos rotativos son tratados como una caja negra donde se desconoce el proceso de secado que ocurre internamente. Por otro lado, las investigaciones realizadas para secaderos rotativos por volúmenes finitos de control [147], ecuaciones de transferencia de calor y masa aplicadas entre secciones, no han brindado mucha información. En este caso, los sensores solo obtienen directamente medidas como la temperatura del gas de secado y el contenido de humedad del material húmedo [148,149].

Desde la perspectiva de la segunda ley de la termodinámica, hay pocos trabajos que se hayan realizado en secaderos rotativos. Akpinar y Sarsilmaz presentaron un análisis de energía y exergía del proceso de secado de albaricoques en un secadero cilíndrico de columna rotativa basado principalmente en las proporciones de utilización de energía y cálculos de pérdida de exergía [150]. Peinado et al. evaluaron el rendimiento energético, la eficiencia exergética y otras variables como la pérdida de energía y la destrucción de exergía en el secadero rotativo de una planta de asfalto [151]. Informaron que la combustión y la transferencia de calor en el hogar causaron la destrucción de exergía, y las pérdidas de energía se debieron a los gases de combustión. Kaveh et al. estudiaron la cinética de secado, la calidad, la energía y el rendimiento exergético en un secadero de tambor rotatorio de aire caliente

para guisantes verdes [152]. Analizaron el efecto del aire a bajas temperaturas y diferentes velocidades de rotación y concluyeron que el aumento de estas variables mejoraba la eficiencia exergética.

Sin embargo, todas estas investigaciones fueron analizadas considerando los secaderos rotativos en su conjunto, donde solo se conocen las variables de entrada y salida. Este enfoque es muy simple y no permite saber qué sucede dentro del tromel. A lo largo de la longitud del tromel, tanto el material húmedo como el flujo de gas de secado experimentan grandes cambios en parámetros como el contenido de humedad, la temperatura, el flujo de exergía, la exergía destruida, el calor y las pérdidas de exergía por la pared y el calor empleado en la evaporación del agua. Por lo tanto, es importante conocer lo que ocurre dentro del tromel para mejorar el diseño y control de estos secaderos.

Para realizar los experimentos, hemos utilizado hueso de aceituna. Es un subproducto obtenido en el proceso de extracción del aceite de oliva, compuesto mayoritariamente por endocarpos fragmentados, finos y pulpa de aceituna [153]. Con una producción mundial de casi 20 millones de toneladas de frutos de aceituna al año, que se recolectan en su mayoría en los países mediterráneos, el sector olivarero genera alrededor de 4 millones de toneladas de hueso de aceituna [154]. Su pequeño tamaño, naturaleza granular, alto rendimiento y valor calorífico neto (alrededor de 18 MJ/kg en contenido de humedad de equilibrio) indican que esta biomasa es apropiada para fines eléctricos, térmicos y de calefacción [155]. Sin embargo, el hueso de aceituna se separa de los residuos de almazara con contenidos de humedad entre el 25 % y el 30 % (base húmeda). En este sentido, este biocombustible necesita ser secado para que alcance su contenido de humedad de equilibrio mejorando así la eficiencia energética y la vida útil de las calderas [156,157]. Además, el secado reduce los costes de transporte y almacenamiento. Después del secado, el hueso de aceituna se clasifica y comercializa en función de su índice de calidad energética, A (biocombustible excelente) o B (biocombustible bueno) [158]. El hueso de aceituna con índice de calidad A contiene sólo pequeñas cantidades de contenido de aceituna, finos y cenizas según la norma UNE-EN 14961-2 [159].

Hay pocos trabajos relacionados con el secado del hueso de aceituna en la bibliografía consultada. Gómez-de la Cruz et al. estudiaron la cinética de secado en un secador convectivo a partir de las pruebas de secado isotérmico a diferentes temperaturas del aire de secado y espesores de muestra [160]. Obtuvieron los tiempos, las velocidades y la temperatura de secado más alta para secar el hueso de aceituna sin riesgo de incendio. Por otro lado, los mismos autores analizaron el fenómeno de transferencia de masa del hueso de aceituna limpio en el mismo secadero a partir de un nuevo método para obtener los coeficientes de difusión [161]. Cuevas et al. obtuvieron las difusividades del agua durante el secado a diferentes temperaturas de secado y espesores de muestra en un horno [162]. Sin embargo, actualmente uno de los mejores métodos para secar el hueso de aceituna son los secaderos rotativos, que permiten secar grandes cantidades en pocos meses [163]. Estos secaderos pueden trabajar con caudales máxicos de hueso de aceituna en torno a los 10.000 kg/h con caudales

de gas de secado entre 80.000 y 100.000 m³/h con dimensiones de 2,5 a 3 m de diámetro y de 20 a 25 m de longitud. Los tiempos de residencia oscilan entre 20 y 30 min.

En este trabajo realizamos un análisis energético y exergético detallado del secado del hueso de aceituna en un secadero rotativo experimental. El equipo ha sido diseñado para estudiar el proceso a partir de seis volúmenes de control. Los experimentos se realizaron a partir de un diseño de experimento basado principalmente en la temperatura del aire de secado de entrada y el caudal de aire de secado, considerando valores constantes como el caudal másico de hueso de aceituna y la velocidad máxima de rotación del tromel. La investigación muestra la evolución de las variables energéticas y exergéticas más importantes a lo largo de la longitud del tromel. El proceso de secado global se analiza a partir de la eficiencia energética y exergética, la eficiencia de secado y el consumo energético unitario. El objetivo principal de este estudio es conocer el secado dentro de los secaderos rotativos para ayudar a mejorar el diseño, control y desarrollo de estos equipos a nivel industrial.

MATERIALES Y MÉTODOS

Materia prima

El hueso húmedo de aceituna fue adquirido de una almazara de la provincia de Jaén. Las aceitunas pertenecían a la variedad Picual. El subproducto se enviaba en cuatro paquetes de aproximadamente 1.000 kg cada uno. Un horno (Memmert GmbH + Co.KG, SNB 167 Model 100, Alemania) obtuvo el contenido de humedad inicial de cinco muestras antes de cada experimento, las cuales fueron secadas a 105 °C durante 24 h según la norma EN 14774-1. El contenido de humedad promedio en todos los experimentos fue de $25,3 \pm 0,5$ % (base húmeda) con un error relativo de 1,85 %. Para calcular el contenido de humedad de equilibrio, varias muestras, dos por big bag, se colocaron en una balanza de precisión (Blauscal 1200 AH con un error de $\pm 0,01$ g) y se expusieron al aire ambiente con una humedad relativa del 50 %. El equilibrio se logró cuando tres mediciones de peso consecutivas mostraron una diferencia de menos de 0,01 g. A continuación, las muestras se secaron en estufa (105 ± 1 °C durante 24 h) para obtener el contenido de materia seca. El valor obtenido fue de $8,5 \pm 0,5$ % (base húmeda). Todas estas muestras se utilizaron para averiguar la distribución del tamaño de las partículas según la norma EN 15149–2. La clasificación se realizó gracias a una criba vibratoria (Restch, Mod. Vibro) mostrando los siguientes resultados: entre 7 y 5 mm (8,7 %), 5 – 3 mm (55,8 %), 3 – 1,5 mm (29,3 %), menos de 1,5 mm (finos y pulpa de aceituna, 6,2 %). La temperatura ambiente durante los experimentos de secado fue de 25 °C, mientras que la humedad relativa fue de 50 %. La presión atmosférica era de 1.013 mbar.

Equipo de secado

El secadero rotativo experimental ha sido diseñado y construido por el grupo de investigación TEP 250. Una descripción más detallada se puede ver en la siguiente referencia [164]. El equipo está compuesto principalmente por una tolva de alimentación, un juego de resistencias eléctricas, un tromel, un ciclón, un ventilador de tiro inducido (IDF), un ventilador de flujo secundario, un panel de control y un ordenador personal (Figura 45).

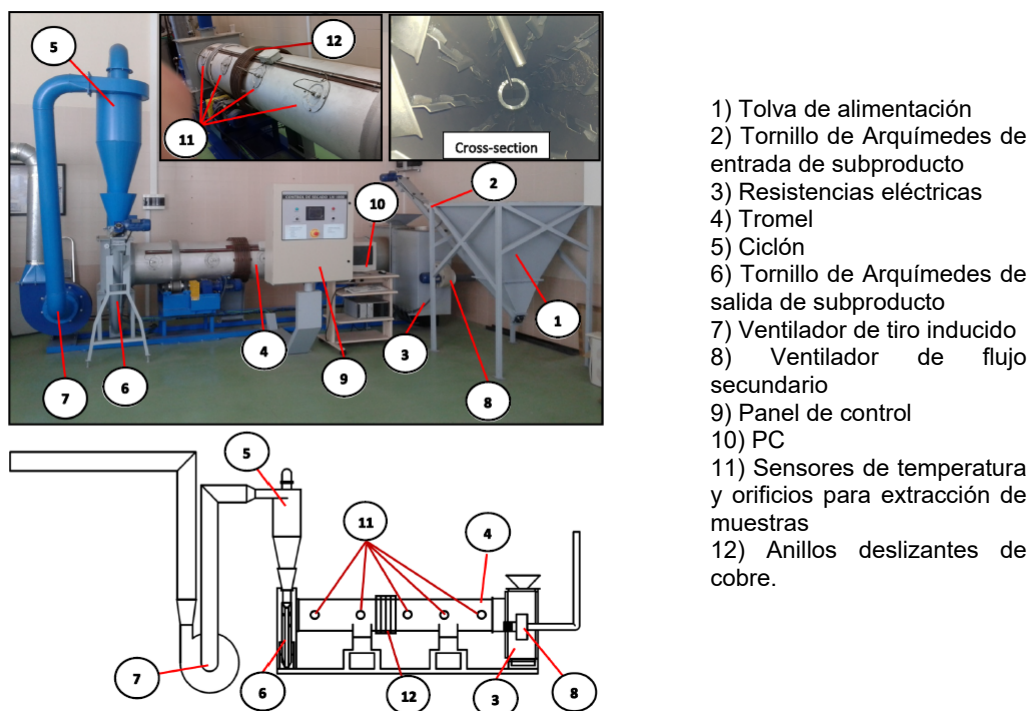


Figura 45. Secador rotativo experimental y descripción detallada de los componentes

La tolva de alimentación con un volumen de $0,44 \text{ m}^3$ suministra hueso de aceituna al tromel a través de un tornillo de Arquímedes, que es accionado por un motor eléctrico de $0,25 \text{ kW}$. El aire se calienta a partir de tres resistencias eléctricas de 18 kW , 18 kW y 9 kW , las cuales están adecuadamente protegidas por una caja de acero aislada. El tromel de acero inoxidable tiene un diámetro de $0,5 \text{ m}$ y una longitud de $3,5 \text{ m}$ con diez palas por sección transversal.

La rotación se realiza mediante un sistema de engranajes, que es accionado por un motor eléctrico de $0,85 \text{ kW}$. Para medir la temperatura del aire de secado en todo el tromel, se colocan cinco sensores PT-100, con una interfaz de $4 - 20 \text{ mA}$, en diferentes longitudes. Además, otros dos sensores están situados en la entrada y salida del tromel. La transmisión de la señal se realiza a través de anillos deslizantes de cobre y escobillas fijadas al tromel. Para tomar muestras y medir su contenido de humedad en cada sección, existe un orificio cerrado con un tapón al lado de cada sensor de temperatura. Un ciclón recupera las partículas suspendidas. El subproducto seco es recogido por el tornillo de Arquímedes mencionado anteriormente. Un IDF accionado por un motor eléctrico de $1,5 \text{ kW}$ origina el flujo de aire de secado, que puede ser regulado por

una válvula de mariposa. Otro ventilador, con un motor eléctrico de 0,37 kW, ayuda a generar el flujo de aire. La velocidad del aire y, por lo tanto, el flujo másico de aire se mide con un tubo de Pitot y un manómetro TESTO 512 en el tubo de PVC unido al soplante. Los motores y las resistencias eléctricas se controlan desde un panel de control y un ordenador, que almacena los datos experimentales. Todos los motores eléctricos están equipados con un variador de frecuencia (VFD).

Diseño de experimentos y descripción del procedimiento.

El diseño de experimentos se ha establecido utilizando dos parámetros fijos según las características del secadero rotativo experimental. Se realizaron nueve ensayos (Tabla 18) a la máxima velocidad de rotación del tromel, 5,5 rpm, y un caudal másico de hueso de aceituna de 40 kg/h. Se han configurado tres temperaturas iniciales del aire de secado, 150 °C, 180 °C y 210 °C y tres caudales de aire de secado 576 kg/h, 425 kg/h y 280 kg/h. Cada experimento se realizó por triplicado.

Tabla 18. Diseño de experimentos para los nueve ensayos realizados.

	Caudal aire secado (kg/h)	Temperatura inicial aire secado (°C)
Ensayo A	576	210
Ensayo B	576	180
Ensayo C	576	150
Ensayo D	425	210
Ensayo E	425	180
Ensayo F	425	150
Ensayo G	280	210
Ensayo H	280	180
Ensayo I	280	150

Antes de comenzar el experimento, se deben programar todas las variables. La velocidad de rotación, el caudal másico de hueso de aceituna y la temperatura del aire de secado se ajustan en el panel de control. El control del secadero rotativo se realiza desde un controlador lógico programable (PLC). La temperatura del aire caliente se configura a partir de un control Proporcional-Integral-Derivativo (PID), que enciende y apaga las resistencias eléctricas. El caudal de aire de secado se programa a tres niveles diferentes (máximo, medio y mínimo) actuando sobre el VDF del motor eléctrico. También se mide el consumo total de energía (resistencias eléctricas y motores eléctricos).

Una vez que se alcanza la condición de estado estable, las temperaturas del aire de secado en cada sección se controlan y almacenan en el ordenador. Para averiguar el contenido de humedad del hueso de aceituna en cada sección, se recogen tres muestras mientras se realiza la prueba. Para ello, se detiene el tromel y se retira el tapón. La temperatura de las muestras de hueso de aceituna también se mide mediante una cámara termográfica (Flir i3). Las muestras se secan en menos de 15 minutos en un analizador de humedad infrarrojo (Sartorius MA 160). Para indagar la pérdida de calor a través de la pared del tromel en cada volumen de control, se ejecutaron los mismos nueve experimentos sin carga (sin hueso de aceituna). El análisis del error experimental se ha estudiado siguiendo

el método descrito por Holman [165]. La incertidumbre, $\alpha_{r,j}$, representada en la ecuación 8, se ha evaluado para varios resultados r_j (como $\dot{E}x$, $\dot{Q}$, η , ψ , etc.) calculados a partir de las diferentes medidas M_i (como temperaturas, caudales másicos, contenido de humedad, etc.), que dependen, a su vez, de sus propias incertidumbres $\alpha_{M,i}$ asociadas a las del sensor, al sistema de adquisición de datos y a la calibración.

$$\alpha_{r,j} = \sqrt{\sum_i \left(\frac{\partial r_j}{\partial M_i} \cdot \alpha_{M,i} \right)^2} \quad (8)$$

De considerar las siguientes precisiones de los sensores: $\pm 0,5$ °C para los sensores PT-100, ± 1 °C para la cámara termográfica, $\pm 0,5$ % para el analizador de humedad y horno, $\pm 0,01$ hPa para el tubo de Pitot y manómetro TESTO 512; las incertidumbres finales para los parámetros hallados varían de 4,5 % a 7,3 %.

Metodología

El análisis de energía y exergía durante el secado del hueso de aceituna se basa en la aplicación de las ecuaciones de conservación de masa, conservación de energía, conservación de exergía y la segunda ley de la termodinámica aplicada a diferentes volúmenes de control (CV). Los balances en cada volumen de control aplicado al aire de secado se resuelven a partir de las temperaturas del aire de secado, el contenido de humedad y la temperatura del hueso de aceituna en cada tramo.

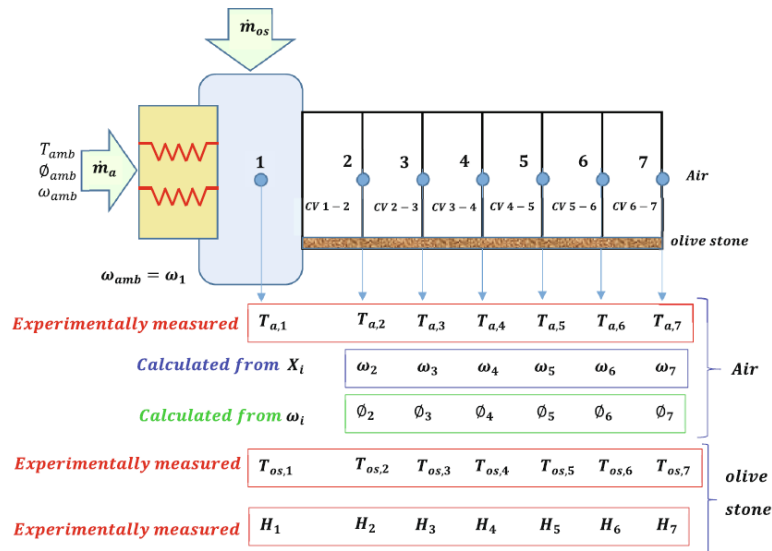


Figura 46. Esquema del secadero rotativo dividido en diferentes volúmenes de control (CV).
Medidas iniciales experimentales y calculadas

La Figura 46 muestra el esquema del secadero rotativo indicando las variables medidas experimentalmente y las nuevas variables obtenidas a partir de la ecuación de conservación de la masa (Figura 47), humedad específica y humedad relativa del aire. El aire de secado, aire húmedo, en la sección de salida de cada volumen de control se puede calcular de la siguiente manera:

$$\dot{m}_{da,j+1} = \dot{m}_{da,j} = \dot{m}_{da} \quad (9)$$

$$\dot{m}_{w,j+1} = \dot{m}_{w,j} = \dot{m}_{ev,j,j+1} \quad (10)$$

donde $\dot{m}_{da}$ y $\dot{m}_{w,j}$ son los caudales másicos de aire seco y agua en la sección j, respectivamente, y $\dot{m}_{ev,j,j+1}$ es el agua evaporada entre las secciones j y j+1 del tromel. El caudal de agua evaporada se puede expresar a partir de las diferencias de contenido de humedad en el hueso de aceituna entre secciones de la siguiente manera:

$$\dot{m}_{ev,j,j+1} = \dot{m}_{os}(H_j - H_{j+1}) \quad (11)$$

donde $\dot{m}_{os}$ es el flujo másico de hueso de aceituna y H_j representa el contenido de humedad del subproducto en la sección j (base húmeda). Una vez conocido el contenido de agua en el aire de secado de cada sección, se puede obtener la humedad específica como sigue:

$$\omega_{j+1} = \omega_j + \frac{\dot{m}_{ev,j,j+1}}{\dot{m}_{da}} \quad (12)$$

donde ω_j es la humedad específica del aire en la sección j y el aire seco se expresa como:

$$\dot{m}_{da} = \frac{\dot{m}_a}{1 + \omega_{amb}} \quad (13)$$

La humedad relativa del aire de secado se obtiene considerando la humedad específica y la presión de saturación del agua para cada temperatura en cada sección.

BALANCE OF MASS

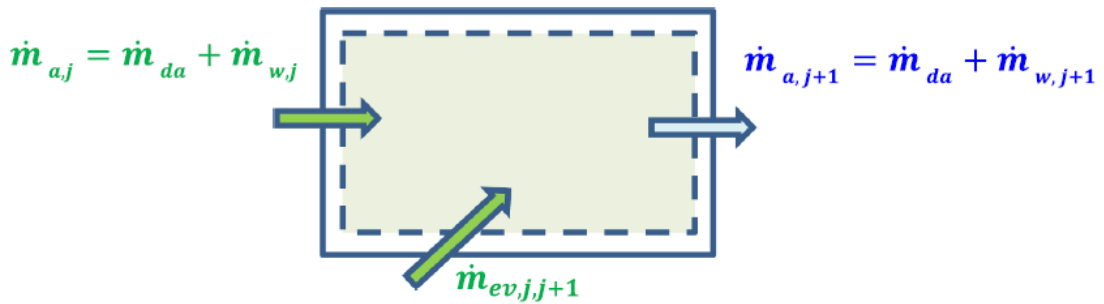


Figura 47. Principio de conservación de la masa aplicado al aire de secado en un volumen de control.

La Figura 48 muestra el balance de energía que tiene lugar en un volumen de control de los secaderos rotativos funcionando en régimen permanente.

BALANCE OF ENERGY

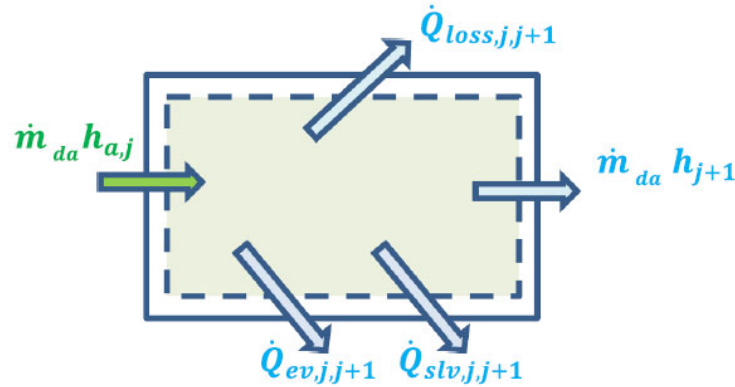


Figura 48. Principio de conservación de la energía aplicado al secado del aire en un volumen de control.

La conservación de la energía se puede escribir como:

$$\dot{m}_{da} h_{a,j} = \dot{Q}_{ev,j,j+1} + \dot{Q}_{slv,j,j+1} + \dot{m}_{da} h_{a,j+1} + \dot{Q}_{loss,j,j+1} \quad (14)$$

En esta ecuación, $\dot{Q}_{ev}$ es la transferencia de calor empleada en el proceso de evaporación y $\dot{Q}_{slv}$ es el calor empleado para calentar el sólido, el líquido y el vapor en cada volumen de control. El término $\dot{Q}_{loss}$ es la pérdida de calor entre las secciones. Las entalpías de entrada y salida, $h_{a,j}$ y $h_{a,j+1}$, se obtienen a partir de la entalpía del vapor de agua y la entalpía del aire seco definidas como:

$$h_{a,j} = c_p T_{a,j} + \omega_j h_{g,j} \quad (15)$$

donde c_p , el calor específico a presión constante, depende de la temperatura del aire seco, y $h_{g,j}$ es la entalpía del vapor saturado a la temperatura T_j . Además, la ecuación anterior considera 0 °C como temperatura de referencia.

Las pérdidas de calor se determinan a partir de los experimentos realizados sin carga. Por lo tanto, la diferencia de temperaturas entre secciones permite obtener la pérdida de calor en cada volumen de control como:

$$\dot{Q}_{loss,j,j+1} = \dot{m}_{da} (h_{WL,j} - h_{WL,j+1}) \quad (16)$$

donde, las entalpías $h_{WL,j}$ y $h_{WL,j+1}$ dependen de la temperatura del aire de secado y la humedad específica. La última variable es constante durante todas las pruebas.

$\dot{Q}_{ev,j,j+1}$, (ec. 17), es la transferencia de calor que ocurre al evaporar el contenido de agua del subproducto en un volumen de control y $\dot{Q}_{slv,j,j+1}$, (ec. 18,19,20) representa tres transferencias de calor adicionales empleadas para elevar la temperatura del sólido seco, del agua contenida en el subproducto y del vapor contenido en el aire de secado [147,149,166,167]. Cada transferencia de calor se puede escribir como:

$$\dot{Q}_{ev,j,j+1} = \dot{m}_{ev,j,j+1} \cdot [h_g(T_{w,j+1}) - h_{w,j}] \quad (17)$$

El término $[h_g(T_{w,j+1}) - h_{w,j}]$ es el calor latente de vaporización del agua. El primer término, $h_g(T_{w,j+1})$, es la entalpía del vapor de agua saturado a la temperatura de saturación del líquido (contenido en el subproducto) en la sección $j+1$ y $h_{w,j}$ es la entalpía del líquido comprimido a la temperatura j .

$$\dot{Q}_{s,j,j+1} = \dot{m}_{ds} c_{p,ds} (T_{s,j+1} - T_{s,j}) \quad (18)$$

$$\dot{Q}_{l,j,j+1} = \dot{m}_{ds} X_j c_{p,w} (T_{w,j+1} - T_{w,j}) \quad (19)$$

$$\dot{Q}_{v,j,j+1} = \dot{m}_{ev,j,j+1} c_{p,v} (T_{a,j} - T_{a,j+1}) \quad (20)$$

En las ecuaciones anteriores, el término $\dot{m}_{ds}$ corresponde con el flujo másico del sólido seco, X_j es el contenido de humedad en base seca en la sección j y $T_{s,j}$, $T_{w,j}$ y $T_{a,j}$ son las temperaturas del sólido seco, agua líquida y aire de secado en la sección j . Aunque se han medido las temperaturas del hueso de aceituna para cada sección, el calor específico del sólido puede variar dependiendo de la naturaleza del subproducto. En cualquier caso, una solución simple y elegante sería incluir las tres últimas ecuaciones (ec. 18 a 20) en una sola. Combinando estas tres ecuaciones y considerando la conservación de la energía (ec. 14) en cada volumen de control se obtiene:

$$\dot{Q}_{slv,j,j+1} = \dot{m}_{da} (h_{a,j} - h_{a,j+1}) - \dot{Q}_{ev,j,j+1} - \dot{Q}_{loss,j,j+1} \quad (21)$$

Todos los términos a la derecha de la igualdad, son fácilmente cuantificables, ya que las entalpías se calculan a partir de la temperatura y la humedad específica del aire, la transferencia de calor en el proceso de evaporación se determina gracias a la ec.17 y la pérdida de calor se calcula a partir de las pruebas realizadas sin carga en las mismas condiciones de temperatura del aire de secado inicial y caudales de aire de secado (ec.16). Sin embargo, en los secaderos rotativos que trabajan a altas temperaturas, este término es muy pequeño con respecto a la transferencia de calor para evaporar el contenido de agua o la pérdida de calor por la pared. Normalmente se obvia este término en la etapa de diseño. Para medirlo, hemos utilizado un nuevo parámetro llamado *factor de calentamiento-slv*, β , que se puede determinar tanto para cada volumen de control como para el secadero rotativo total de la siguiente manera:

$$\beta = \frac{\sum \dot{Q}_{slv,j,j+1}}{\sum \dot{Q}_{slv,j,j+1} + \sum \dot{Q}_{ev,j,j+1} + \sum \dot{Q}_{loss,j,j+1}} \quad (22)$$

Asimismo, el factor de pérdida de calor, γ , se puede analizar en cada volumen de control y en todo el secadero rotativo como sigue:

$$\gamma = \frac{\sum \dot{Q}_{loss,j,j+1}}{\sum \dot{Q}_{slv,j,j+1} + \sum \dot{Q}_{ev,j,j+1} + \sum \dot{Q}_{loss,j,j+1}} \quad (23)$$

El balance de exergía aplicado al aire de secado para cada volumen de control se muestra en la Figura 49.

BALANCE OF EXERGY

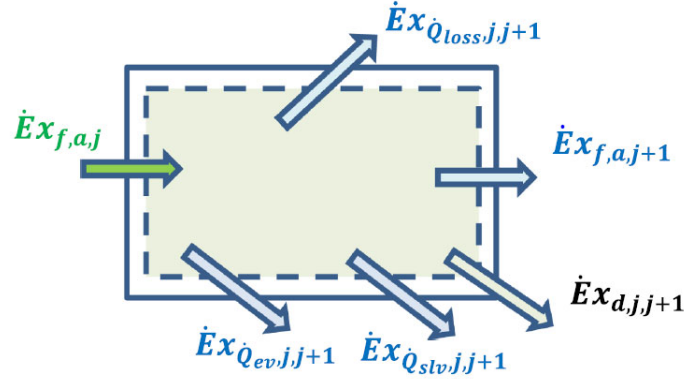


Figura 49. Balance de exergía aplicada al aire de secado en un volumen de control.

La exergía de flujo del aire de secado de entrada en cada sección $\dot{E}x_{f,a,j}$, se reduce debido a la exergía asociada a la transferencia de calor en la evaporación del agua $\dot{E}x_{\dot{Q}_{ev,j,j+1}}$, la exergía asociada al aumento de temperatura en el sólido seco, agua y vapor $\dot{E}x_{\dot{Q}_{slv,j,j+1}}$, la exergía asociada a la pérdida de calor por la pared $\dot{E}x_{\dot{Q}_{loss,j,j+1}}$, y la destrucción de exergía $\dot{E}x_{d,j,j+1}$. La exergía asociada a la pérdida de calor por la pared y la destrucción de exergía durante el proceso de secado son significativas y, por tanto, deben cuantificarse, ec. 24.

$$\dot{E}x_{f,a,j} = \dot{E}x_{\dot{Q}_{ev,j,j+1}} + \dot{E}x_{\dot{Q}_{slv,j,j+1}} + \dot{E}x_{\dot{Q}_{loss,j,j+1}} + \dot{E}x_{f,a,j+1} + \dot{E}x_{d,j,j+1} \quad (24)$$

Las exergías de flujo de entrada y salida se pueden determinar mediante la siguiente ecuación:

$$\dot{E}x_{f,a,j} = \dot{m}_{da} [h_j - h_0 - T_0(s_{a,j} - s_{a,0})] \quad (25)$$

donde T_0 es la temperatura ambiente. La entropía del aire de secado, s_a , se define como:

$$s_{a,j} = \left(c_{p,a} \ln \frac{T_j}{T_0} - R_a \ln \frac{p_{da,j}}{p_{da,0}} \right) + \omega_j (s_g(T_j) - R_w \ln(\phi_j)) - \omega_0 (s_g(T_0) - R_w \ln(\phi_0)) \quad (26)$$

En esta ecuación, $p_{da,j}$ es la presión del aire seco a la temperatura j , R_a y R_w son las constantes universales de los gases para el aire y el agua, respectivamente, s_g es la entropía del vapor saturado a la temperatura j y ϕ_j es la humedad relativa a la temperatura j .

Las exergías asociadas a los calores definidos en las ecuaciones 16,17 y 21, pueden ser calculadas, respectivamente, como:

$$\dot{E}x_{\dot{Q}_{loss,j,j+1}} = \left(1 - \frac{T_0}{T_{b,j,j+1}}\right) \dot{Q}_{loss,j,j+1} \quad (27)$$

$$\dot{E}x_{\dot{Q}_{ev,j,j+1}} = \left(1 - \frac{T_0}{T_{b,j,j+1}}\right) \dot{Q}_{ev,j,j+1} \quad (28)$$

$$\dot{E}x_{\dot{Q}_{slv,j,j+1}} = \left(1 - \frac{T_0}{T_{b,j,j+1}}\right) \dot{Q}_{slv,j,j+1} \quad (29)$$

La temperatura límite, $T_{b,j,j+1}$, es el valor medio de las temperaturas del aire de secado entre las secciones j y $j + 1$.

La destrucción de exergía en cada volumen de control se puede expresar a partir del teorema de Gouy-Stodola (ec. 30) o simplemente, usando la ec. 24, ya que todos los demás términos, excepto la destrucción de exergía, son conocidos [168]:

$$\dot{E}x_{d,j,j+1} = T_0 \Delta \dot{S}_{gen,j,j+1} \quad (30)$$

Por lo tanto, la generación de entropía, $\Delta \dot{S}_{gen,j,j+1}$, en cada volumen de control, considerando la operación en estado estable, se puede expresar como:

$$\Delta \dot{S}_{gen,j,j+1} = - \left(\frac{\dot{Q}_{loss,j,j+1} + \dot{Q}_{ev,j,j+1} + \dot{Q}_{slv,j,j+1}}{T_{b,j,j+1}} \right) + \dot{S}_{a,j+1} - \dot{S}_{a,j} \quad (31)$$

Las entropías de entrada y salida, $\dot{S}_{a,j+1}$ y $\dot{S}_{a,j}$, de cada volumen de control se calculan multiplicando el caudal de aire seco por las entropías específicas (ec. 26) [169].

Eficiencia energética, exergética y de secado. Consumo unitario de energía

El rendimiento del secadero rotativo se evalúa en su conjunto a partir de las contribuciones obtenidas en todos los volúmenes de control. Por lo tanto, la **eficiencia energética** se expresa como la relación entre la energía requerida para llevar a cabo la evaporación del agua y la energía entregada en la primera sección del tromel:

$$\eta = \frac{\dot{Q}_{ev}}{\dot{m}_{da} h_{a,1}}$$

La **eficiencia exergética** relaciona la exergía asociada al proceso de evaporación y la exergía de flujo suministrada en la primera sección del tromel. La expresión se puede definir de la siguiente manera:

$$\psi = \frac{\dot{E}x_{\dot{Q}_{ev}}}{\dot{E}x_{f,a,1}}$$

La **eficiencia de secado** se estimó considerando el contenido de humedad inicial, el contenido de humedad final y el contenido de humedad de equilibrio en el hueso de aceituna (base seca) de la siguiente manera:

$$\epsilon = \frac{X_{in} - X_{out}}{X_{in} - X_{eq}}$$

Esta ecuación asigna un valor de eficiencia de secado del 100 %, si el contenido de humedad final es igual o menor que el contenido de humedad de equilibrio, que es realmente el objetivo final.

Finalmente, se utilizó el **consumo unitario de energía (UEC)** para cuantificar la energía total suministrada para producir la evaporación de agua por unidad de caudal durante el secado del subproducto. Esta expresión se puede escribir como:

$$UEC = \frac{\dot{m}_{da} h_{a,1}}{\dot{m}_{ev}}$$

RESULTADOS

Análisis de propiedades termodinámicas

Los tiempos de residencia se obtuvieron entre 15 y 18 min. La Figura 50 muestra la evolución de la temperatura del aire de secado, el contenido de humedad del hueso de aceituna y la temperatura del mismo con respecto a la longitud del tromel para cada experimento. Además, se muestran las temperaturas del aire de secado durante los experimentos sin carga, que permitieron calcular las pérdidas de calor por la pared. Se puede apreciar que el contenido de humedad del hueso de aceituna y la temperatura del aire de secado disminuyeron a lo largo del tromel, mientras que la humedad específica (ω) del aire de secado aumentó debido al fenómeno de evaporación del agua [147,149,170]. Por otro lado, se aumentó la temperatura del hueso de aceituna (T_{os}) hasta la salida del tromel con valores finales entre 45 °C y 52 °C.

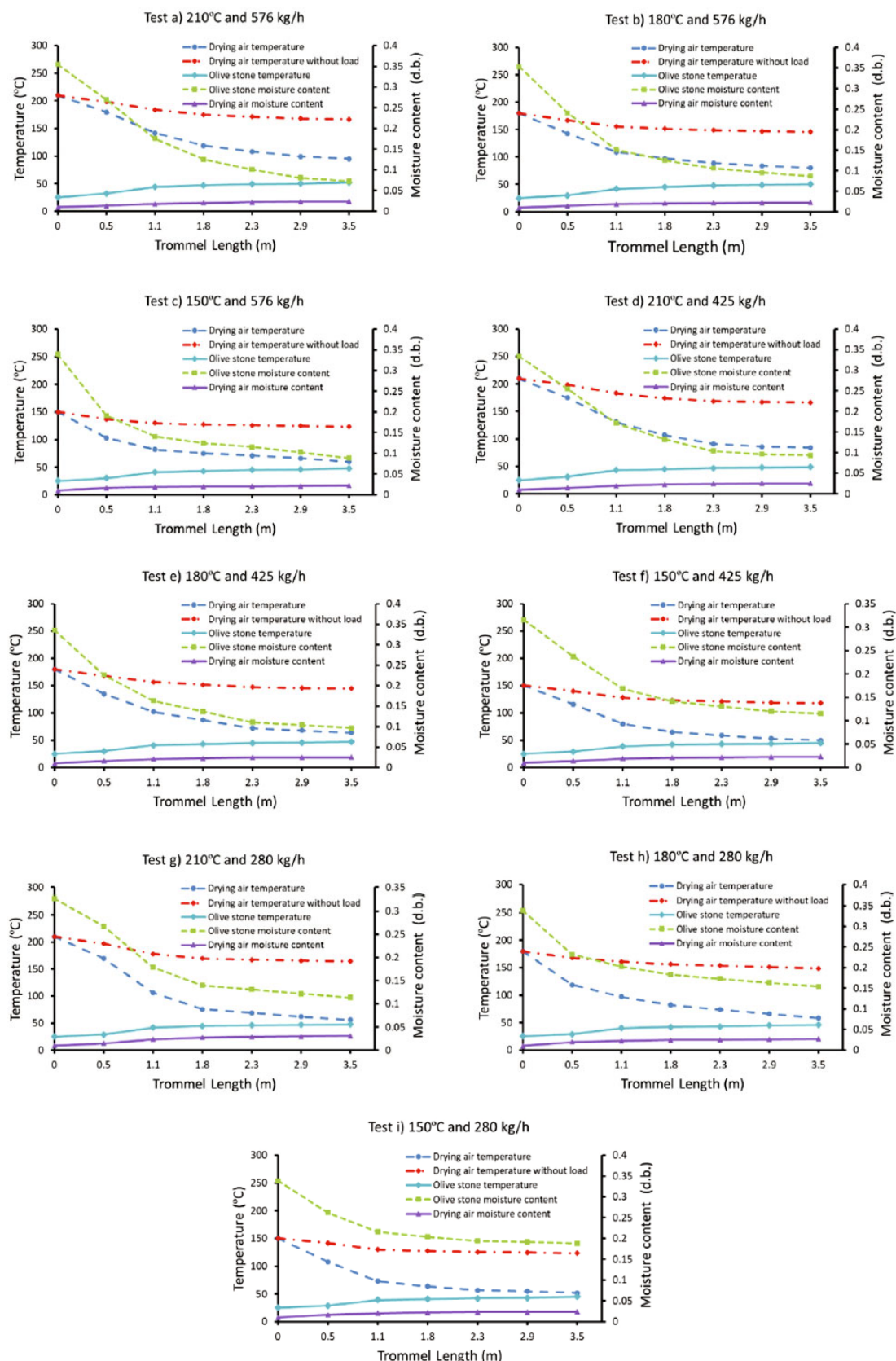


Figura 50. Evolución de la temperatura y humedad del hueso de aceituna y aire de secado a lo largo del trommel.

Los experimentos realizados en el secadero rotativo experimental indicaron que el proceso de secado es bastante aceptable, ya que la humedad de salida del hueso de aceituna se aproxima a la humedad de equilibrio, a excepción de los ensayos H e I.

La mayor disminución de la humedad del hueso de aceituna se produjo en el primer tercio del tromel, entre 0 y 1,1 m, lo que originó una drástica reducción de la temperatura del aire de secado. Este hecho está asociado a un gran choque térmico y ocurre principalmente en secaderos rotativos en equicorriente, donde se pueden utilizar altas temperaturas del aire de secado mitigando el riesgo de incendio en el interior del tromel. Entre estas secciones, el hueso de aceituna redujo su contenido de humedad a la mitad independientemente del flujo de aire de secado y de la temperatura inicial del mismo. Sin embargo, a bajas temperaturas iniciales del aire de secado y bajo flujo de aire, desde el primer tercio del tromel, el aire de secado perdió capacidad para evaporar agua debido a que la temperatura del aire de secado cayó por debajo de los 100 °C.

En la Tabla 19 se especifican las propiedades termodinámicas en diferentes secciones del tromel para cada experimento. La humedad relativa (ϕ) no superó en ningún caso el 30 %, evitando el riesgo de condensación de agua a la salida del secadero. También se indica la presión de saturación del vapor en la interfase líquido-aire ($p_{v,int}$), ya que la temperatura del subproducto se conoce en todas las secciones.

Tabla 19. Propiedades termodinámicas durante los experimentos de secado en tromel.

ENSAYO A	Longitud del Tromel (m)						
	0	0,5	1,1	1,8	2,3	2,9	3,5
T_{aire} (°C)	210±1	180±1	142±2	119±2	108±2	99±2	95±2
H (base húmeda, %)	26,2±0,1	21,2±0,1	14,9±0,2	11,1±0,1	9,1±0,2	7,5±0,2	6,8±0,2
ω (kg _w /kg _{da})	0,010	0,013	0,018	0,020	0,022	0,023	0,023
ϕ (p.u.)	0,001	0,002	0,006	0,014	0,023	0,034	0,040
$p_{v,a}$ (bar)	0,016	0,021	0,028	0,032	0,034	0,036	0,037
T_{os} (°C)	25±1	32±1	44±1	47±1	49±1	50±1	52±1
$p_{v,int}$ (bar)	0,031	0,047	0,090	0,105	0,117	0,123	0,136
ENSAYO B							
T_{aire} (°C)	180±1	143±2	109±2	97±2	89±2	84±2	80±2
H (base húmeda, %)	26,1±0,2	19,4±0,2	13,1±0,2	11,1±0,2	9,5±0,2	8,6±0,2	8,1±0,1
ω (kg _w /kg _{da})	0,010	0,014	0,019	0,020	0,021	0,022	0,022
ϕ (p.u.)	0,001	0,005	0,019	0,032	0,047	0,059	0,071
$p_{v,a}$ (bar)	0,016	0,023	0,030	0,032	0,034	0,035	0,035
T_{os} (°C)	25±1	30±1	42±1	45±1	48±1	49±1	50±1
$p_{v,int}$ (bar)	0,031	0,042	0,081	0,095	0,111	0,117	0,123
ENSAYO C							
T_{aire} (°C)	150±1	103±2	82±2	75±2	71±1	66±1	60±1
H (base húmeda, %)	25,3±0,2	16,1±0,2	12,3±0,2	11,1±0,1	10,3±0,2	9,3±0,2	8,1±0,1
ω (kg _w /kg _{da})	0,010	0,016	0,019	0,020	0,020	0,021	0,022
ϕ (p.u.)	0,003	0,021	0,055	0,078	0,095	0,123	0,170
$p_{v,a}$ (bar)	0,016	0,026	0,030	0,031	0,032	0,033	0,034
T_{os} (°C)	25±1	30±1	41±1	43±1	45±1	46±1	48±1
$p_{v,int}$ (bar)	0,031	0,042	0,077	0,085	0,095	0,100	0,111
ENSAYO D							
T_{aire} (°C)	210±1	175±1	131±1	107±2	91±1	86±1	84±1
H (base húmeda, %)	25,0±0,2	20,3±0,2	14,6±0,2	11,7±0,2	9,4±0,1	8,7±0,1	8,5±0,1
ω (kg _w /kg _{da})	0,010	0,014	0,020	0,022	0,025	0,025	0,025
ϕ (p.u.)	0,001	0,002	0,009	0,024	0,049	0,062	0,067
$p_{v,a}$ (bar)	0,016	0,023	0,031	0,035	0,039	0,039	0,040
T_{os} (°C)	25±1	31±1	43±1	45±1	47±1	48±1	49±1
$p_{v,int}$ (bar)	0,031	0,044	0,085	0,095	0,105	0,111	0,117

ENSAYO E							
T_{aire} (°C)	180±1	135±1	102±1	87±1	72±1	68±1	64±1
H (base húmeda, %)	25,1±0,2	18,4±0,2	14,0±0,2	12,0±0,1	9,9±0,2	9,4±0,2	8,8±0,1
ω (kg _w /kg _{da})	0,010	0,016	0,020	0,022	0,024	0,025	0,025
ϕ (p.u.)	0,001	0,007	0,027	0,052	0,108	0,132	0,162
$p_{v,a}$ (bar)	0,016	0,026	0,032	0,035	0,038	0,039	0,040
T_{os} (°C)	25±1	30±1	41±1	43±1	45±1	46±1	47±1
$p_{v,int}$ (bar)	0,031	0,042	0,077	0,085	0,095	0,100	0,031
ENSAYO F							
T_{aire} (°C)	150±1	116±1	80±2	65±2	59±1	53±1	50±1
H (base húmeda, %)	24,0±0,2	19,2±0,2	14,4±0,2	12,4±0,1	11,6±0,2	10,7±0,1	10,4±0,1
ω (kg _w /kg _{da})	0,010	0,014	0,019	0,021	0,022	0,022	0,023
ϕ (p.u.)	0,003	0,011	0,060	0,128	0,176	0,244	0,289
$p_{v,a}$ (bar)	0,016	0,023	0,030	0,033	0,034	0,035	0,036
T_{os} (°C)	25±1	29±1	39±1	42±1	43±1	44±1	45±1
$p_{v,int}$ (bar)	0,031	0,039	0,069	0,081	0,085	0,090	0,031
ENSAYO G							
T_{aire} (°C)	210±1	170±2	106±1	76±2	69±2	62±1	56±1
H (base húmeda, %)	24,7±0,2	21,1±0,2	15,2±0,1	12,3±0,2	11,6±0,1	10,8±0,1	10,2±0,1
ω (kg _w /kg _{da})	0,010	0,015	0,023	0,028	0,029	0,030	0,031
ϕ (p.u.)	0,001	0,002	0,026	0,103	0,145	0,207	0,285
$p_{v,a}$ (bar)	0,016	0,024	0,037	0,043	0,045	0,046	0,048
T_{os} (°C)	25±1	29±1	42±1	45±1	46±1	47±1	48±1
$p_{v,int}$ (bar)	0,031	0,039	0,081	0,095	0,100	0,105	0,111
ENSAYO H							
T_{aire} (°C)	180±1	119±2	97±2	82±2	74±2	66±1	58±1
H (base húmeda, %)	25,3±0,2	18,9±0,2	16,9±0,2	15,5±0,1	14,8±0,1	14,0±0,1	13,4±0,1
ω (kg _w /kg _{da})	0,010	0,019	0,022	0,024	0,025	0,026	0,027
ϕ (p.u.)	0,001	0,014	0,035	0,069	0,102	0,152	0,229
$p_{v,a}$ (bar)	0,016	0,030	0,035	0,038	0,039	0,041	0,042
T_{os} (°C)	25±1	29±1	40±1	42±1	43±1	45±1	46±1
$p_{v,int}$ (bar)	0,031	0,039	0,073	0,081	0,085	0,095	0,100
ENSAYO I							
T_{aire} (°C)	150±1	108±2	73±2	64±1	57±1	55±1	52±1
H (base húmeda, %)	25,3±0,2	20,8±0,2	17,8±0,1	16,9±0,2	16,2±0,2	16,1±0,1	15,9±0,1
ω (kg _w /kg _{da})	0,010	0,016	0,021	0,022	0,023	0,023	0,023
ϕ (p.u.)	0,003	0,017	0,088	0,140	0,205	0,228	0,268
$p_{v,a}$ (bar)	0,016	0,026	0,033	0,034	0,036	0,036	0,037
T_{os} (°C)	25±1	29±1	39±1	41±1	42±1	43±1	45±1
$p_{v,int}$ (bar)	0,031	0,039	0,069	0,077	0,081	0,085	0,095

Los valores de entalpías y entropías del aire caliente disminuyeron a medida que se avanzaba a lo largo del tromel debido principalmente al proceso de evaporación y la pérdida de calor por las paredes. Estos valores sufrieron un drástico descenso en el primer tercio del tromel donde se llevó a cabo gran parte del fenómeno de evaporación y pérdida de calor. La exergía de flujo presentó el mismo comportamiento que las entalpías y entropías en el aire caliente. De hecho, a partir de 1,1 metros de longitud, la exergía de flujo descendió lentamente gracias a que la capacidad de aire de secado disminuyó hasta el final del tromel. La evolución de entalpías, entropías y exergías de flujo se puede mostrar en la Figura 51. Todos los cálculos pertenecen a valores de exergías obtenidos para un estado muerto igual a la atmósfera ambiente en composición, presión y temperatura [171].

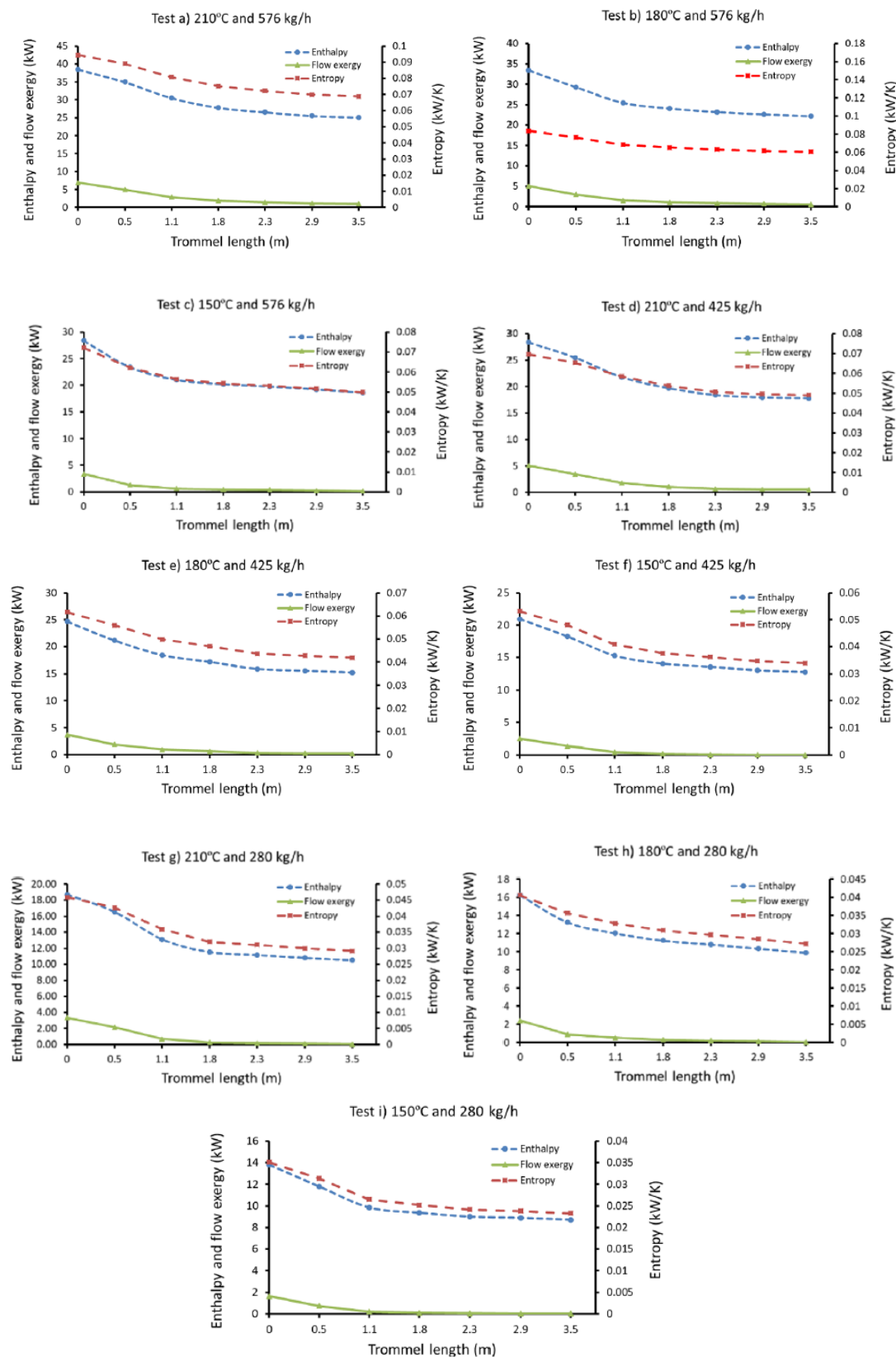
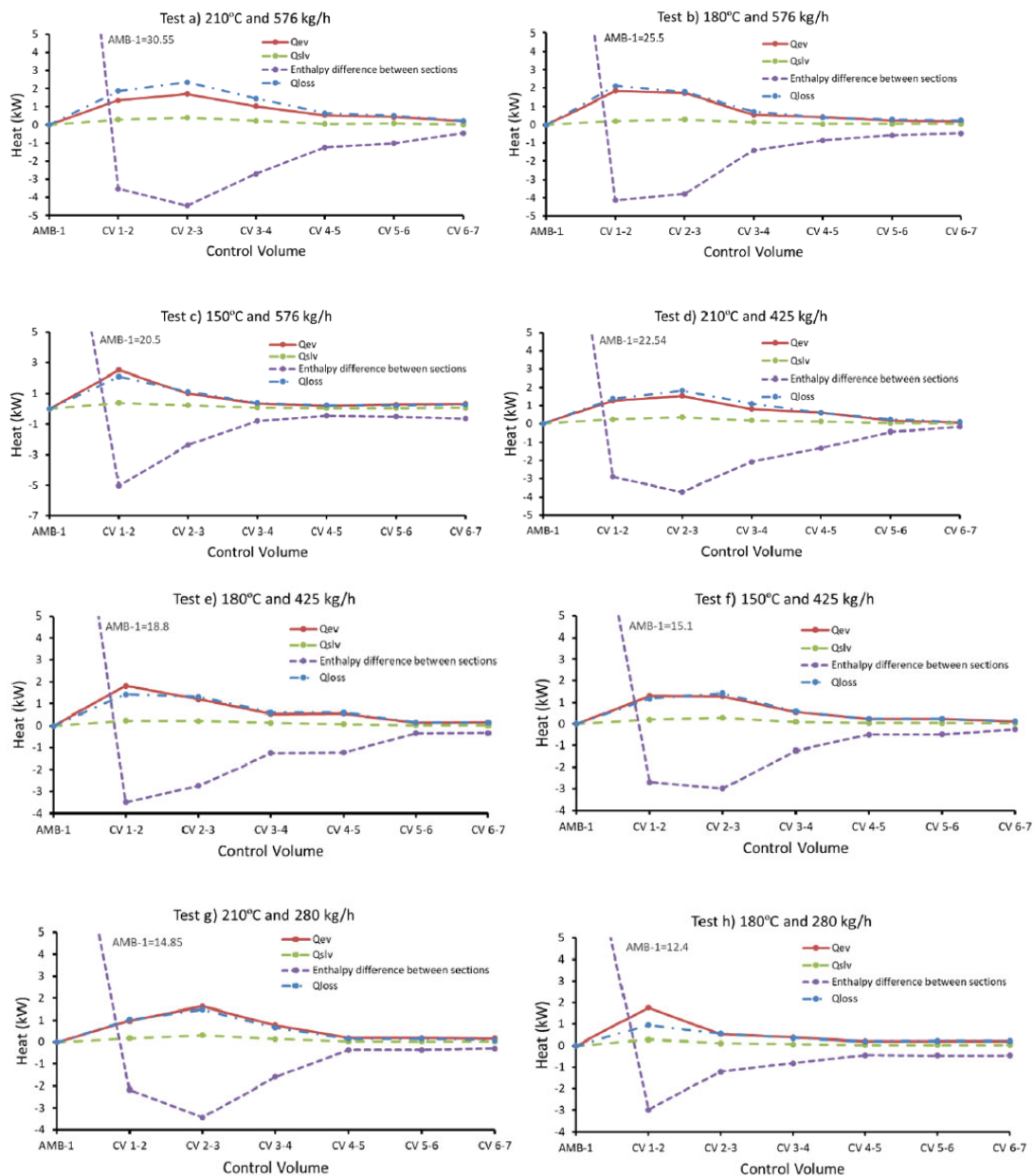


Figura 51. Evolución de entalpía, entropía y exergía de flujo en el tromel.

Análisis de energía y exergía.

La Figura 52 muestra la diferencia de entalpía y las diferentes transferencias de calor que tienen lugar en cada volumen de control del secadero rotativo. El volumen de control AMB-1 no fue considerado para analizar el proceso de secado, ya que en esta etapa solo ocurrió el calentamiento del aire de secado a su paso por las resistencias eléctricas. No obstante, se muestra para cada experimento la variación de entalpía producida durante el calentamiento.



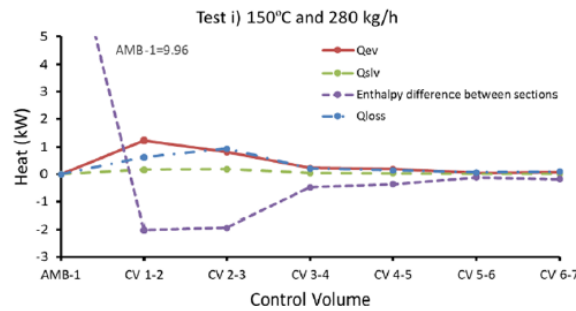


Figura 52. Transferencia de calor y variación de entalpía en los distintos volúmenes de control.

Considerando la transferencia de calor, el mayor consumo de energía se debe al proceso de evaporación, siendo mayor en los dos primeros volúmenes de control donde se presenta el choque térmico. La pérdida de calor también fue significativa al comienzo del secadero. Como se mencionó anteriormente en la metodología, estos valores se obtuvieron a partir de ensayos de secado basados en el diseño de experimentos, realizados sin carga. La pérdida de calor representó un porcentaje considerable durante el secado en el secadero rotativo experimental. La razón principal es un coeficiente de transferencia de calor global muy alto a través de la envolvente cilíndrica, ya que no es aconsejable aislar este tipo de equipos cuando se trabaja a altas temperaturas por riesgo de incendio.

Por otro lado, la transferencia de calor invertida en elevar la temperatura del agua sólida, líquida y vapor de agua en el aire de secado fue muy pequeña con respecto a la transferencia de calor empleada en la evaporación del agua y la pérdida de calor por la pared. Tanto el factor de pérdida de calor como el factor de calentamiento “slv” se detallan en la Tabla 20. Los resultados se indican para cada volumen de control y para todo el secadero rotativo. En los volúmenes de control, los factores de pérdida de calor oscilaron entre 30 % y 55 %.

Tabla 20. Factor de calentamiento “slv” y factor de pérdida de calor en cada CV y en todo el tromel.

Factor calentamiento slv, β (%)	CV 1-2	CV 2-3	CV 3-4	CV 4-5	CV 5-6	CV 6-7	GLOBAL
Ensayo A	8,36	8,85	8,25	4,80	8,64	4,99	8,08
Ensayo B	4,82	7,84	9,86	5,37	8,53	10,96	6,96
Ensayo C	7,86	10,01	9,77	8,16	6,80	8,73	8,55
Ensayo D	8,29	9,41	8,13	8,92	6,57	9,55	8,68
Ensayo E	6,99	8,29	10,44	6,37	10,71	5,04	7,82
Ensayo F	7,65	9,50	7,57	8,29	6,66	10,92	8,39
Ensayo G	8,31	9,16	8,95	6,53	4,02	8,74	8,53
Ensayo H	9,70	9,88	9,41	9,41	9,17	9,39	9,62
Ensayo I	8,30	9,78	9,48	7,59	9,01	9,17	8,97
Factor pérdida de calor, γ (%)	CV 1-2	CV 2-3	CV 3-4	CV 4-5	CV 5-6	CV 6-7	GLOBAL
Ensayo A	53,10	52,76	53,85	52,08	48,99	50,51	52,64
Ensayo B	50,90	46,94	51,60	46,31	50,49	51,28	49,29
Ensayo C	41,77	47,27	48,33	49,52	39,79	42,05	43,91
Ensayo D	47,54	49,17	53,02	45,44	54,97	54,06	49,34
Ensayo E	40,89	47,80	47,13	48,19	46,05	44,66	45,02
Ensayo F	43,90	47,44	47,77	47,58	47,96	46,83	46,34
Ensayo G	47,16	43,69	41,96	42,73	43,27	31,67	43,78
Ensayo H	31,53	45,69	43,75	45,14	49,04	48,88	39,18
Ensayo I	30,92	48,27	43,62	40,82	54,01	53,95	40,74

Este factor de pérdida de calor, también presentó valores altos en la última parte del tromel, ya que la temperatura del aire de secado disminuye por esta razón y no por el proceso de evaporación. A pesar de esto, el análisis global indicó que este factor se encuentra entre 39 % y 53 %, valores frecuentemente mayores a los utilizados en la literatura en el diseño de secaderos rotativos [172].

Además, el impacto de la transferencia de calor destinada a elevar la temperatura de sólido, líquido y vapor fue despreciable o muy pequeño. El factor de calentamiento “slv” muestra que estos valores varían entre 4 % y 11 %. Para todo el secadero rotativo, se encuentran entre 6 % y 10 %. Este hecho deja claro que en ocasiones esta transferencia de calor no es crucial en el diseño de estos equipos.

Con respecto a la diferencia de entalpía entre secciones, cayó bruscamente en los dos primeros volúmenes de control, CV1-2 y CV2-3 debido principalmente al proceso de evaporación y la pérdida de calor por las paredes. Esto puede observarse en los ensayos realizados a altas temperaturas iniciales del aire de secado y flujos másicos de aire. En los sucesivos volúmenes de control, la diferencia de entalpía entre secciones tiende a ser constante, ya que el aire disminuye su capacidad de secado. La Figura 53 muestra el diagrama de Sankey para el experimento G, que detalla la evolución energética a partir de los volúmenes de control.

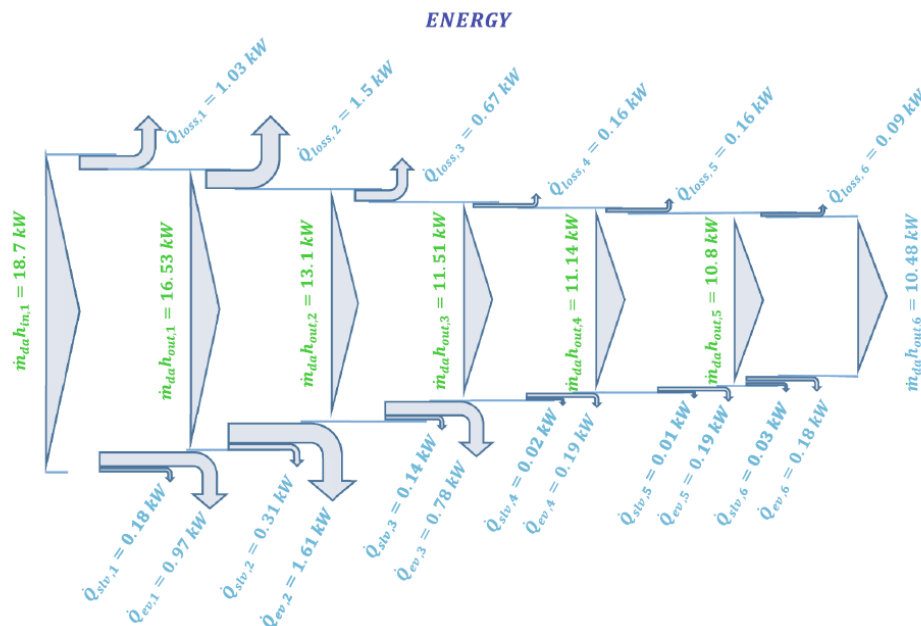


Figura 53. Diagrama de Sankey para el Ensayo G, temperatura inicial 210 °C y caudal de aire de secado de 280 kg/h.

La exergía destruida, la diferencia de exergía de flujo y la exergía asociada a la pérdida de calor por la pared se pueden apreciar para cada volumen de control en la Figura 54. La destrucción de exergía está ligada al fenómeno de evaporación del agua, y, por lo tanto, resulta muy alta al inicio del proceso de secado, principalmente en los dos primeros volúmenes de control. A medida que avanzaba el aire de secado, este valor tendía a ser constante hasta el final del

secadero rotativo. La disminución de la destrucción de exergía se manifiesta desde el CV2-3 donde la cantidad de agua evaporada fue pequeña. En este sentido, la destrucción de exergía está claramente asociada al proceso de evaporación del agua y, por supuesto, es inevitable.

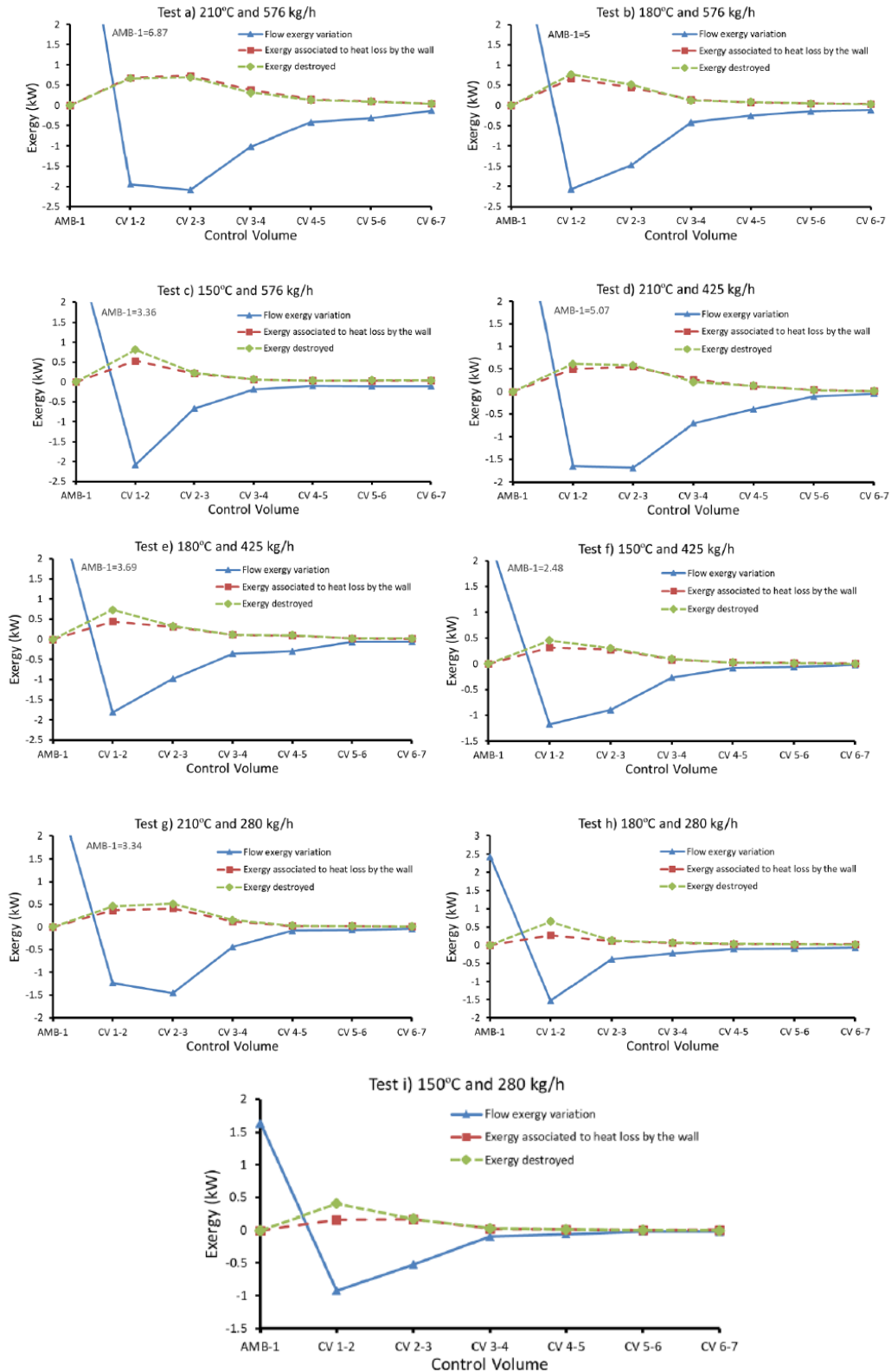


Figura 54. Evolución de las exergías en los volúmenes de control del secadero rotativo.

Las variaciones de exergía de flujo fueron negativas en todos los volúmenes de control. Su valor disminuyó drásticamente en los dos primeros y moderadamente en los siguientes debido a la exergía destruida y la exergía asociada a la pérdida de calor. De hecho, la exergía asociada a la pérdida de calor jugó un papel muy importante en todo proceso de secado siendo muy similar a la exergía destruida en la gran mayoría de los volúmenes de control.

La Figura 55 ilustra el diagrama de Grossman para la prueba G, donde la exergía destruida fue muy alta en los dos primeros volúmenes de control, aproximadamente el 28,6 % de la exergía total que ingresó al tromel. La exergía asociada a la pérdida de calor fue del 23,2 %, la correspondiente al proceso de evaporación fue del 23,5 % y al aumento de temperatura del sólido seco, agua y vapor fue del 4,5 % [173].

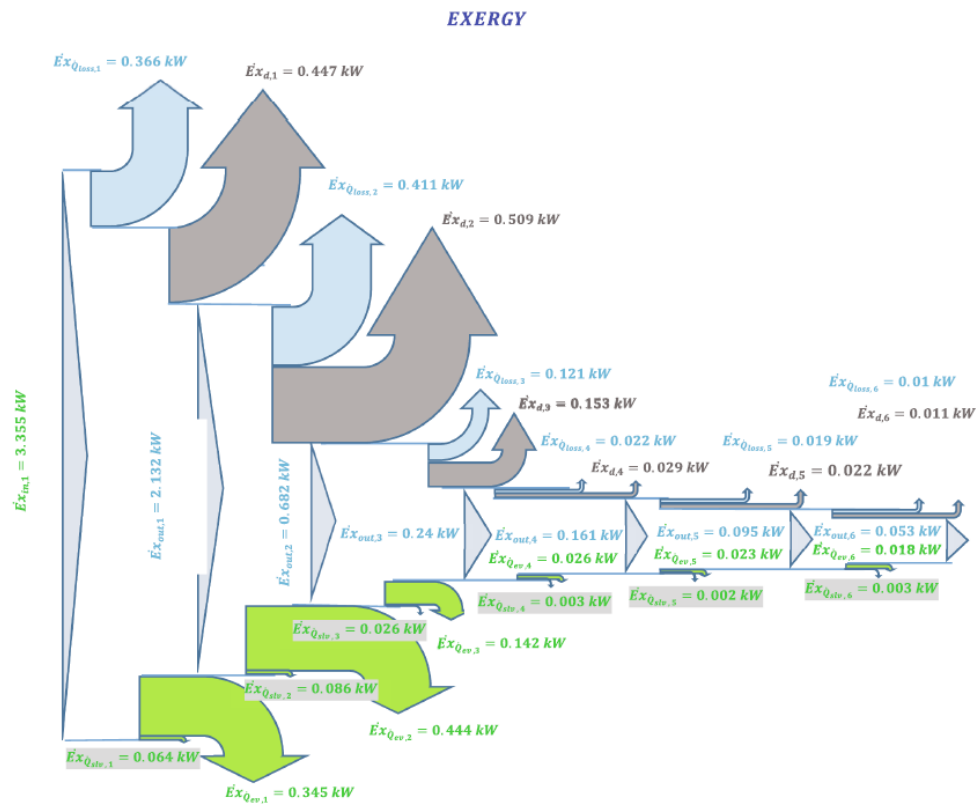


Figura 55. Diagrama de Grossman para ensayo G, temperatura inicial 210 °C y caudal de aire de secado 280 kg/h.

De esta forma, la energía disponible para los siguientes volúmenes de control fue solo el 20,2 % de la exergía total del flujo a la entrada del tromel, lo que confirmó que la capacidad de secado disminuyó enormemente en los siguientes volúmenes de control. Por otro lado, el diagrama de Grossman muestra como la exergía asociada a $\dot{Q}_{slv,j,j+1}$ es muy pequeña. Este hecho evidenció que el análisis de energía y exergía en secaderos rotativos se puede realizar considerando únicamente el aire de secado en los volúmenes de control.

Rendimiento global del secadero rotativo.

A partir del diseño de experimentos se representó la eficiencia de secado durante todo el proceso de secado del hueso de aceituna considerando la temperatura inicial del aire de secado y el caudal del mismo (Fig. 56.a). Como se ha mencionado en el apartado correspondiente al análisis de propiedades termodinámicas, el secado del hueso de aceituna se completó en todos los ensayos, a excepción del H e I, donde las eficiencias de secado presentaron valores muy bajos, 75,1 % y 61,2 %, respectivamente. Las pruebas A y E tuvieron eficiencias de secado superiores al 98 %, mientras que las pruebas F y G tuvieron un 90 % aproximadamente.

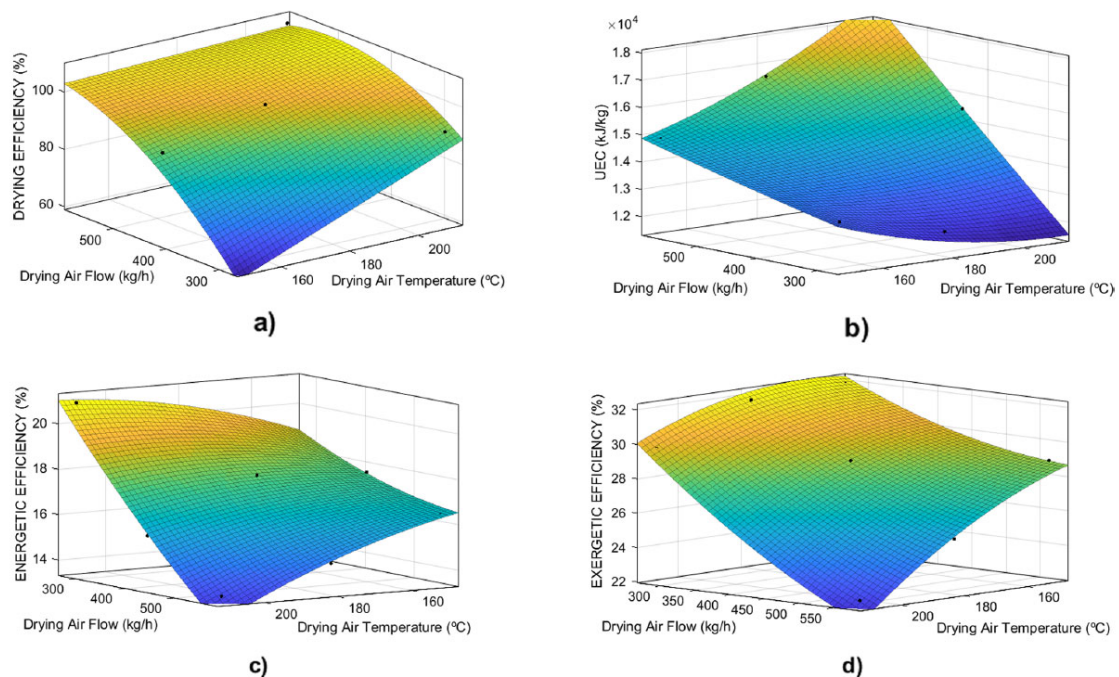


Figura 56. Parámetros generales para evaluar el rendimiento del secadero: a) Eficiencia de secado, b) Consumo Unitario de Energía, c) Eficiencia energética y d) Eficiencia exergética.

El análisis del consumo energético unitario (UEC) indicó que los valores más altos se encuentran a bajos flujos y temperaturas iniciales de aire de secado, principalmente en las pruebas H e I que, como ya se ha comentado, tenían una eficiencia de secado muy baja. Los valores mínimos se obtuvieron para el ensayo G (11.619,8 kJ/kg), E (13.571,8 kJ/kg) y F (13.799 kJ/kg) [163]. La tendencia del consumo unitario de energía se refleja en la Figura 56 b.

La eficiencia energética, representada en la Figura 56.c., se encontró entre 13 % y 21 %, siendo su valor máximo de 20,95 % para el ensayo G. Para los experimentos realizados a 576 kg/h (ensayos A, B y C), la eficiencia energética cayó por debajo del 16,5 %.

Finalmente, en cuanto a eficiencia exergética (Figura 56.d.) los resultados mostraron valores por debajo del 32 % debido principalmente a la destrucción de exergía y a la exergía asociada a la pérdida de calor por las paredes. Los valores

máximos se encontraron para las pruebas H e I, las cuales se realizaron a 180 °C y 280 kg/h y 150 °C y 280 kg/h, respectivamente. Sin embargo, estas pruebas no realizaron un correcto secado del subproducto. Por tanto, las mayores eficiencias exergéticas se ubicaron para la prueba G (29,7 %) y F (29,4 %), donde dicha eficiencia es superior al 90 %.

En definitiva, considerando como valores óptimos aquellos que presentaban eficiencias de secado superiores al 90 %, el secadero rotativo experimental trabajó en condiciones óptimas (altas eficiencias exergéticas y energéticas y bajo consumo unitario de energía) con caudales de aire de secado medios-bajos (425-280 kg/h) y temperaturas iniciales del aire de secado bajas-medias (180-150 °C).

Los resultados obtenidos en esta investigación difieren de los reportados en la literatura por dos razones fundamentales: las temperaturas del aire de secado y la pérdida de calor por las paredes son muy altas. Del Giudice et al. trabajaron en el secado de astillas de chopo y acacia negra en un secador rotativo móvil de 5 m de longitud y 0,8 m de diámetro utilizando temperaturas de gas de secado inferiores a 100 °C (caldera de calefacción) [174]. El proceso de secado permitió una reducción del contenido de humedad del 35 % y 63 % para chopo y acacia obteniendo valores de consumo energético unitario de 4.570 kJ/kg y 4.350 kJ/kg, respectivamente. Las eficiencias de secado durante el secado de chopo y acacia se establecieron en 37 % y 27 %, respectivamente. Gómez-de la Cruz et al. realizaron estudios de secado de orujos de almazara bifásica en un secadero industrial rotatorio de 30 m de longitud y 3 m de diámetro [163]. El secado se realizó a 643 °C (horno alimentado con orujo seco desaceitado) con un contenido de humedad inicial y final de 45 % y 15 % (base húmeda), respectivamente. Obtuvieron valores de consumo energético unitario y eficiencia energética de 4.739 kJ/kg y 54 %, respectivamente. Por otro lado, Kaveh et al. realizaron una investigación sobre el secado de guisantes verdes en un secadero rotativo experimental con calentador eléctrico considerando la temperatura del aire de secado (entre 40 °C y 70 °C) y la velocidad de rotación del tambor rotatorio (5 rpm y 15 rpm) [152]. Los resultados de este trabajo muestran valores de eficiencia exergética entre 54,34 % (40 °C y 5 rpm) a 83,82 % (70 °C y 15 rpm). Finalmente, Peinado et al. utilizaron un secadero rotativo empleado en una planta de mezcla asfáltica en caliente para el calentamiento y secado de los áridos [151]. Obtuvieron eficiencias energéticas y exergéticas del 89 % y 18 %, respectivamente. La baja eficiencia exergética se debía principalmente a la alta destrucción de exergía originada por la combustión y la transferencia de calor a diferentes temperaturas en el hogar.

CONCLUSIONES

Los resultados de esta investigación muestran la importancia de abordar el estudio de los secaderos rotativos a partir de volúmenes finitos de control, lo que puede ayudar a futuros diseños y control del proceso.

Se ha evidenciado que el choque térmico realizado en el primer tercio del tromel producido por el fenómeno de evaporación del agua, redujo a la mitad el contenido de humedad del subproducto, induciendo una destrucción exergética considerable, principalmente en los dos primeros volúmenes de control. En lugar de trabajar con las temperaturas de entrada y salida, como ocurre hoy en día, el proceso de secado se podría realizar controlando y fijando la temperatura de secado en cualquiera de los diferentes tramos. Este hecho permitiría optimizar la cantidad de agua evaporada en cada volumen de control según la naturaleza del subproducto (flujo másico de subproducto y aire de secado, contenido de humedad, etc).

Además, los parámetros utilizados para estudiar el secadero rotativo en su conjunto revelaron que el equipo funciona de manera eficiente a temperaturas de aire de secado iniciales bajas-medias y flujos de aire de secado bajos-medios. Implica que sería muy interesante disminuir la velocidad del aire de secado y disminuir las temperaturas iniciales del aire en este equipo para mejorar el proceso de secado. Además, estas condiciones reducirían el riesgo de incendio.

Las pérdidas de calor son muy importantes. Sin embargo, la solución no debe basarse en el aislamiento del tromel, ya que existe riesgo de incendio del subproducto en el interior.

La transferencia de calor empleada para elevar la temperatura en el sólido seco, agua líquida y vapor de agua es muy pequeña, menos del 10 % de las transferencias de calor totales, lo que indica que podría despreciarse o considerar este valor con respecto a la transferencia de calor total empleada.

La evaluación de los análisis de exergía y energía a lo largo del tromel aseguran el adecuado funcionamiento del proceso de secado, identificando los lugares donde pueden aparecer ineficiencias y su cuantificación, decidiendo dónde y de qué manera aplicar las mejoras durante el proceso de secado.

CONCLUSIONES FINALES

- Para solventar la mala miscibilidad del etanol en gasoil, se ha observado que los mejores aditivos son el biodiesel y el butanol, que dan buenos resultados incluso a bajas concentraciones.
- Respecto a las mezclas que no presentan problemas de miscibilidad, el ensayo de densidad ha mostrado que esta propiedad es proporcional a la concentración de cada combustible en la mezcla biodiesel-bioetanol siguiendo una tendencia lineal. Sin embargo, la tensión superficial aumenta siguiendo una tendencia polinómica de segundo grado al aumentar la concentración de biodiesel en etanol.
- Se ha demostrado que es posible caracterizar geométricamente, de una forma suficientemente precisa y económica, el interior de un inyector mediante el método de la silicona.
- Se ha corroborado que el uso de la zeolita ZAP USY disminuye la energía de activación requerida para todos los plásticos ensayados en el proceso de pirólisis, dando lugar a una reducción de la cantidad de residuo sólido y a un combustible líquido con una distribución de cadenas de C más cortas comparado con una pirólisis térmica.
- El uso del catalizador ha demostrado ser más efectivo a la hora de romper los dobles enlaces, lo cual es más favorable para el óptimo funcionamiento de los motores de combustión interna alternativos.
- El producto líquido de la pirólisis catalítica se presenta como una alternativa a la gasolina, mientras que la pirólisis térmica produce aceites similares al gasóleo.
- Se concluye que las propiedades de los aceites influyen significativamente en el fenómeno de la cavitación dentro del orificio de inyección de la boquilla y en su salida.
- La menor viscosidad de los combustibles pirolíticos conlleva una menor fricción del flujo a través de la boquilla, y por tanto una mayor velocidad, lo que compensa la influencia de la menor densidad en la masa total inyectada.
- Se ha observado que la menor densidad y viscosidad de los aceites ocasiona una propagación más rápida de la cavitación dentro del orificio y un aumento de la fracción de volumen de vapor a la salida del orificio de inyección y un adelanto el tiempo de su aparición.

- El producto de baja calidad obtenido a través de una pirólisis térmica de HDPE ha demostrado ser apto como sustituto del HFO para su uso en plantas de potencia de turbina de gas.
- Basándonos en balances de energía y exergía, para el secado óptimo del hueso de aceituna, mediante secadero rotativo, se requieren temperaturas de aire de secado iniciales y flujos de aire bajos-medios, lo que adicionalmente mitiga el riesgo de incendio de esta biomasa.

FINAL CONCLUSIONS

- To overcome the poor miscibility of ethanol in diesel fuel, it was observed that the best additives are biodiesel and butanol, which provide good results even at low concentrations.
- Regarding blends without miscibility problems, tests showed that density is proportional to the concentration of each fuel in the biodiesel-bioethanol mixture following a linear trend. However, the surface tension increases following a second-degree polynomial trend as the concentration of biodiesel in ethanol increases.
- It is possible to geometrically characterize, accurately and economically, the interior of an injector using the silicone method.
- The use of the ZAP USY zeolite reduces the activation energy required for all the plastics tested in the pyrolysis process, reducing the amount of solid residue and producing liquid fuel with a carbon chain distribution shorter compared to thermal pyrolysis.
- The use of the catalyst is more effective since it helps to break the double bonds, which is more favorable for the optimal operation of reciprocating engines.
- The liquid product of catalytic pyrolysis is presented as an alternative to gasoline, while thermal pyrolysis produces oils similar to diesel fuel.
- The oils' properties significantly influence the phenomenon of cavitation inside the nozzle injection orifice and in its output.
- The lower viscosity of pyrolytic fuels leads to less friction of the flow through the nozzle and, therefore, a higher velocity, which compensates for the influence of the lower density on the total mass injected.
- The lower density and viscosity of the oils cause a more rapid propagation of cavitation inside the hole and an increase in the volume fraction of vapor at the outlet of the injection hole, and an advance in the time of its appearance.
- The low quality product obtained through thermal pyrolysis of HDPE is suitable as a substitute for HFO in gas turbine power plants.
- Based on energy and exergy balances, for the optimal drying of the olive stone, using a rotary dryer, low-medium initial drying air temperatures and air flows are required, which additionally mitigates the risk of biomass burning.

TRABAJO FUTURO

- Determinar propiedades de las mezclas bioetanol-gasol y bioetanol-biodiesel, que no están en la bibliografía consultada, como son la velocidad del sonido a altas presiones.
- Estudiar un proceso de pirólisis en dos fases para la obtención de combustibles aptos para aviación.
- Optimizar los parámetros del proceso de pirólisis (tiempo de residencia, temperatura de craqueo, tasa de calentamiento, etc.) de biomasa procedente de la caña de azúcar. Además, se plantea analizar otro tipo de materia prima, como es el hueso de mango.
- Ensayar aceites pirolíticos en turborreactor a escala de laboratorio para determinar las prestaciones y emisiones y compararlas con los combustibles convencionales.

REFERENCIAS

- [1] Acuerdos sobre cambio climático. (2015). París. <https://www.consilium.europa.eu/es/policies/climate-change/timeline/>. .
- [2] Acción por el clima de la UE. (2015). https://ec.europa.eu/clima/citizens/eu_es.
- [3] Hoornweg D, Bhada-Tata P, Kennedy C Environment: Waste production must peak this century. *Nature* 2013;502:615-7.
- [4] Singh AP, Dhar A, Agarwal AK Evolving energy scenario: role and scope for alternative fuels in transport sector. In: Anonymous Prospects of Alternative Transportation Fuels. : Springer, 2018:7-19.
- [5] Lindfeldt EG, Westermarck MO Biofuel production with CCS as a strategy for creating a CO₂-neutral road transport sector. *Energy Procedia* 2009;1:4111-8.
- [6] Transport Policy EU: light-duty: emissions transportpolicy.net. (s.f.). <https://www.transportpolicy.net/?Title=EU%3A+Light-duty%3A+Emissions>.
- [7] <https://dieselinformation.aecc.eu/es/cual-es-la-normativa-para-los-vehiculos-diesel-y-como-se-aplica/>.
- [8] Lešnik L, Vajda B, Žunič Z, Škerget L, Kegl B The influence of biodiesel fuel on injection characteristics, diesel engine performance, and emission formation. *Appl Energy* 2013;111:558-70.
- [9] Lapuerta M, Rodríguez-Fernández J, Agudelo JR Diesel particulate emissions from used cooking oil biodiesel. *Bioresour Technol* 2008;99:731-40.
- [10] Kwanchareon P, Luengnaruemitchai A, Jai-In S Solubility of a diesel–biodiesel–ethanol blend, its fuel properties, and its emission characteristics from diesel engine. *Fuel* 2007;86:1053-61.
- [11] Li D, Zhen H, Xingcai L, Wu-gao Z, Jian-Guang Y Physico-chemical properties of ethanol–diesel blend fuel and its effect on performance and emissions of diesel engines. *Renewable Energy* 2005;30:967-76.
- [12] Srivastava A, Prasad R Triglycerides-based diesel fuels. *Renewable and sustainable energy reviews* 2000;4:111-33.
- [13] Alonso-Gómez LA, Bello-Pérez LA Materias primas usadas para la producción de etanol de cuatro generaciones: retos y oportunidades. *Agrociencia* 2018;52:967-90.
- [14] Hansen AC, Zhang Q, Lyne PW Ethanol–diesel fuel blends—a review. *Bioresour Technol* 2005;96:277-85.

- [15] Benjumea P, Agudelo J, Agudelo A Basic properties of palm oil biodiesel–diesel blends. *Fuel* 2008;87:2069-75.
- [16] Kwanchareon P, Luengnaruemitchai A, Jai-In S Solubility of a diesel–biodiesel–ethanol blend, its fuel properties, and its emission characteristics from diesel engine. *Fuel* 2007;86:1053-61.
- [17] Tutak W, Jamrozik A, Pyrc M, Sobiepański M A comparative study of co-combustion process of diesel-ethanol and biodiesel-ethanol blends in the direct injection diesel engine. *Appl Therm Eng* 2017;117:155-63.
- [18] Nabi MN, Zare A, Hossain FM, Ristovski ZD, Brown RJ Reductions in diesel emissions including PM and PN emissions with diesel-biodiesel blends. *J Clean Prod* 2017;166:860-8.
- [19] Ajav EA, Akingbehin OA A study of some fuel properties of local ethanol blended with diesel fuel. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal* 2002.
- [20] Lapuerta M, Armas O, Garcia-Contreras R Stability of diesel–bioethanol blends for use in diesel engines. *Fuel* 2007;86:1351-7.
- [21] Fernando S, Hanna M Development of a novel biofuel blend using ethanol–biodiesel– diesel microemulsions: EB-diesel. *Energy Fuels* 2004;18:1695-703.
- [22] Kinast JA Production of Biodiesels from Multiple Feedstocks and. 2003.
- [23] Knothe G Dependence of biodiesel fuel properties on the structure of fatty acid alkyl esters. *Fuel Process Technol* 2005;86:1059-70.
- [24] Monyem A, Canakci M, Van Gerpen JH Investigation of biodiesel thermal stability under simulated in-use conditions. *Appl Eng Agric* 2000;16:373.
- [25] Torres-Jimenez E, Svoljšak-Jerman M, Gregorc A, Lisec I, Dorado MP, Kegl B Physical and chemical properties of ethanol– biodiesel blends for diesel engines. *Energy Fuels* 2010;24:2002-9.
- [26] Alptekin E, Canakci M Determination of the density and the viscosities of biodiesel–diesel fuel blends. *Renewable Energy* 2008;33:2623-30.
- [27] Tesfa B, Mishra R, Gu F, Powles N Prediction models for density and viscosity of biodiesel and their effects on fuel supply system in CI engines. *Renewable Energy* 2010;35:2752-60.
- [28] Wang F, Wu J, Liu Z Surface tensions of mixtures of diesel oil or gasoline and dimethoxymethane, dimethyl carbonate, or ethanol. *Energy Fuels* 2006;20:2471-4.
- [29] Europe P, E PRO. Plastics-the facts <https://plasticseurope.org/wp-content/uploads/2021/10/2019-Plastics-the-facts.pdf>.

- [30] Benavides PT, Sun P, Han J, Dunn JB, Wang M Life-cycle analysis of fuels from post-use non-recycled plastics. *Fuel* 2017;203:11-22.
- [31] EEA E Transport: Increasing Oil Consumption and Greenhouse Gas Emissions Hamper EU Progress Towards Environment and Climate Objectives. Agência Europeia do Ambiente 2019:12.
- [32] Sharuddin SDA, Abnisa F, Daud, Wan Mohd Ashri Wan, Aroua MK A review on pyrolysis of plastic wastes. *Energy conversion and management* 2016;115:308-26.
- [33] Wang G, Dai Y, Yang H, et al. A review of recent advances in biomass pyrolysis. *Energy Fuels* 2020;34:15557-78.
- [34] Uddin MN, Techato K, Taweekun J, et al. An overview of recent developments in biomass pyrolysis technologies. *Energies* 2018;11:3115.
- [35] UNE-EN-14214:2013 V2+A1. (2018). Productos petrolíferos líquidos. Ésteres metílicos de ácidos grasos (FAME) para motores diesel y equipos de calefacción. Requisitos y métodos de ensayo. Asociación Española de Normalización.
- [36] Torres-Jimenez E, Jerman MS, Gregorc A, Lisec I, Dorado MP, Kegl B Physical and chemical properties of ethanol–diesel fuel blends. *Fuel* 2011;90:795-802.
- [37] Torres-Jimenez E, Kegl M, Dorado R, Kegl B Numerical injection characteristics analysis of various renewable fuel blends. *Fuel* 2012;97:832-42.
- [38] Kegl B, Hribernik A Experimental analysis of injection characteristics using biodiesel fuel. *Energy Fuels* 2006;20:2239-48.
- [39] Torres-Jimenez E, Dorado MP, Kegl B Experimental investigation on injection characteristics of bioethanol–diesel fuel and bioethanol–biodiesel blends. *Fuel* 2011;90:1968-79.
- [40] Vajda B, Lešnik L, Bombek G, et al. The numerical simulation of biofuels spray. *Fuel* 2015;144:71-9.
- [41] Lee CS, Park SW, Kwon SI An experimental study on the atomization and combustion characteristics of biodiesel-blended fuels. *Energy Fuels* 2005;19:2201-8.
- [42] Liao S, Zhang R, Li Q Spray Atomization Characteristics of the Biodiesel of Different Blending Ratio.
- [43] Palomar JM, Cruz F, Ortega A, Jimenez-Espadafor FJ, Martínez G, Dorado MP Development of a computer model to simulate the injection process of a diesel engine. *Energy Fuels* 2005;19:1526-35.

- [44] Palomar JM, Cruz-Peragón F, Jimenez-Espadafor FJ, Dorado MP Computer model to simulate the injection process in a rotary injection pump: The inverse problem. *Energy Fuels* 2007;21:110-20.
- [45] Huang J, Wang Y, Li S, Roskilly AP, Yu H, Li H Experimental investigation on the performance and emissions of a diesel engine fuelled with ethanol–diesel blends. *Appl Therm Eng* 2009;29:2484-90.
- [46] Lapuerta M, Armas O, Herreros JM Emissions from a diesel–bioethanol blend in an automotive diesel engine. *Fuel* 2008;87:25-31.
- [47] Contreras MRG Estudio de mezclas basadas en bioetanol sobre las emisiones de un motor diésel. 2009.
- [48] De Caro PS, Mouloungui Z, Vaitilingom G, Berge JC Interest of combining an additive with diesel–ethanol blends for use in diesel engines. *Fuel* 2001;80:565-74.
- [49] Xing-Cai L, Jian-Guang Y, Wu-Gao Z, Zhen H Effect of cetane number improver on heat release rate and emissions of high speed diesel engine fueled with ethanol–diesel blend fuel. *Fuel* 2004;83:2013-20.
- [50] Agarwal AK Biofuels (alcohols and biodiesel) applications as fuels for internal combustion engines. *Progress in energy and combustion science* 2007;33:233-71.
- [51] Rakopoulos DC, Rakopoulos CD, Giakoumis EG, Papagiannakis RG, Kyritsis DC Experimental-stochastic investigation of the combustion cyclic variability in HSDI diesel engine using ethanol–diesel fuel blends. *Fuel* 2008;87:1478-91.
- [52] Dohle U, Dürnholtz M, Kampmann S, Hammer J, Hinrichsen C 4th generation diesel common-rail injection system for future emission legislation. 2004.
- [53] Nuszowski JP The effects of fuel additives on diesel engine emissions during steady state and transient operation. : West Virginia University, 2008.
- [54] Farkade HS, Pathre AP Experimental investigation of methanol, ethanol and butanol blends with gasoline on SI engine. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering* 2012;2:205-15.
- [55] Khalife E, Tabatabaei M, Demirbas A, Aghbashlo M Impacts of additives on performance and emission characteristics of diesel engines during steady state operation. *Progress in energy and Combustion Science* 2017;59:32-78.
- [56] Chen H, Shi-Jin S, Jian-Xin W Study on combustion characteristics and PM emission of diesel engines using ester–ethanol–diesel blended fuels. *Proceedings of the Combustion institute* 2007;31:2981-9.

- [57] Graboski MS, McCormick RL Combustion of fat and vegetable oil derived fuels in diesel engines. *Progress in energy and combustion science* 1998;24:125-64.
- [58] Cheung CS, Di Y, Huang Z Experimental investigation of regulated and unregulated emissions from a diesel engine fueled with ultralow-sulfur diesel fuel blended with ethanol and dodecanol. *Atmos Environ* 2008;42:8843-51.
- [59] Shi X, Pang X, Mu Y, et al. Emission reduction potential of using ethanol–biodiesel–diesel fuel blend on a heavy-duty diesel engine. *Atmos Environ* 2006;40:2567-74.
- [60] UNE-EN 15376:2015, “Combustibles para automoción. Etanol como componente de mezclas para gasolina. Requisitos y métodos de ensayo”, 2015.
- [61] Lapuerta M, Armas O, Garcia-Contreras R Effect of ethanol on blending stability and diesel engine emissions. *Energy Fuels* 2009;23:4343-54.
- [62] Waterland LR, Venkatesh S, Unnasch S Safety and performance assessment of ethanol/diesel blends (E-diesel). 2003.
- [63] Lapuerta M, García-Contreras R, Campos-Fernández J, Dorado MP Stability, lubricity, viscosity, and cold-flow properties of alcohol– diesel blends. *Energy Fuels* 2010;24:4497-502.
- [64] Pickering C, Byrne J The benefits of publishing systematic quantitative literature reviews for PhD candidates and other early-career researchers. *Higher Education Research & Development* 2014;33:534-48.
- [65] Letcher TM Diesel blends for diesel engines. *S Afr J Sci* 1983;79:4-7.
- [66] <https://www.o2diesel.com/>.
- [67] Meiring P, Allan RS, Hansen AC, Lyne P Tractor performance and durability with ethanol-diesel fuel. *Trans ASAE* 1983;26:59-0062.
- [68] Yahuza I, Dandakouta H A performance review of ethanol-diesel blended fuel samples in compression-ignition engine. *Journal of Chemical Engineering & Process Technology* 2015;6:1-6.
- [69] Liu H, Wang X, Zhang D, et al. Investigation on blending effects of gasoline fuel with N-butanol, DMF, and ethanol on the fuel consumption and harmful emissions in a GDI vehicle. *Energies* 2019;12:1845.
- [70] Pidol L, Lecointe B, Starck L, Jeuland N Ethanol–biodiesel–diesel fuel blends: performances and emissions in conventional diesel and advanced low temperature combustions. *Fuel* 2012;93:329-38.

- [71] Lei J, Shen L, Bi Y, Chen H A novel emulsifier for ethanol–diesel blends and its effect on performance and emissions of diesel engine. *Fuel* 2012;93:305-11.
- [72] Cole RL, Poola RB, Sekar R, Schaus JE, McPartlin P Effect of ethanol fuel additive on diesel emissions. 2001.
- [73] Ahmed I Oxygenated diesel: emissions and performance characteristics of ethanol-diesel blends in CI engines. SAE technical paper 2001;2001.
- [74] Konstandopoulos AG, Kostoglou M, Vlachos N, Kladopoulou E Progress in diesel particulate filter simulation. *SAE International* 2005:1.
- [75] De Villiers E, Gosman AD, Weller HG Large eddy simulation of primary diesel spray atomization. *SAE transactions* 2004:193-206.
- [76] <https://www.kruss-scientific.com/products/tensiometers/force-tensiometer-k20/>.
- [77] Agarwal AK, Sharma N, Singh AP, Kumar V, Satsangi DP, Patel C Adaptation of methanol–dodecanol–diesel blend in diesel genset engine. *Journal of Energy Resources Technology* 2019;141.
- [78] Bayraktar H An experimental study on the performance parameters of an experimental CI engine fueled with diesel–methanol–dodecanol blends. *Fuel* 2008;87:158-64.
- [79] Huang Z, Lu H, Jiang D, et al. Combustion behaviors of a compression-ignition engine fuelled with diesel/methanol blends under various fuel delivery advance angles. *Bioresour Technol* 2004;95:331-41.
- [80] Kuszewski H Physical and Chemical Properties of 1-Butanol–Diesel Fuel Blends. *Energy Fuels* 2018;32:11619-31.
- [81] Mollenhauer K, Tschöke H, Johnson KG Handbook of diesel engines. : Springer Berlin, 2010.
- [82] Macián V, Bermúdez V, Payri R, Gimeno J New technique for determination of internal geometry of a diesel nozzle with the use of silicone methodology. *Exp Tech* 2003;27:39-43.
- [83] de Metrología CE Procedimiento DI-001 para la Calibración de Proyector de Perfiles. : Ministerio de Industria y Energía, 1999.
- [84] Guía para la expresión de Incertidumbre de Medida. Centro Español de Metrología. Elaborado por el Grupo de Trabajo 1 del Comité Conjunto de Guías en Metrología.
- [85] Yoon SH, Cha JP, Lee CS An investigation of the effects of spray angle and injection strategy on dimethyl ether (DME) combustion and exhaust

emission characteristics in a common-rail diesel engine. *Fuel Process Technol* 2010;91:1364-72.

[86] Lee BH, Song JH, Chang YJ, Jeon CH Effect of the number of fuel injector holes on characteristics of combustion and emissions in a diesel engine. *International Journal of Automotive Technology* 2010;11:783-91.

[87] Fadillah G, Fatimah I, Sahroni I, Musawwa MM, Mahlia TMI, Muraza O Recent progress in low-cost catalysts for pyrolysis of plastic waste to fuels. *Catalysts* 2021;11:837.

[88] Kassargy C, Awad S, Burnens G, Kahine K, Tazerout M Gasoline and diesel-like fuel production by continuous catalytic pyrolysis of waste polyethylene and polypropylene mixtures over USY zeolite. *Fuel* 2018;224:764-73.

[89] Silva AO, Souza MJ, Pedrosa AM, Coriolano AC, Fernandes Jr VJ, Araujo AS Development of HZSM-12 zeolite for catalytic degradation of high-density polyethylene. *Microporous and Mesoporous Materials* 2017;244:1-6.

[90] Kassargy C, Awad S, Burnens G, Kahine K, Tazerout M Experimental study of catalytic pyrolysis of polyethylene and polypropylene over USY zeolite and separation to gasoline and diesel-like fuels. *J Anal Appl Pyrolysis* 2017;127:31-7.

[91] Miandad R, Barakat MA, Aburizaiza AS, Rehan M, Nizami AS Catalytic pyrolysis of plastic waste: A review. *Process Saf Environ Prot* 2016;102:822-38.

[92] Serrano DP, Aguado J, Escola JM, Rodríguez JM, San Miguel G An investigation into the catalytic cracking of LDPE using Py–GC/MS. *J Anal Appl Pyrolysis* 2005;74:370-8.

[93] Shareef SM, Mohanty DK Experimental investigations of dairy scum biodiesel in a diesel engine with variable injection timing for performance, emission and combustion. *Fuel* 2020;280:118647.

[94] Liu J, Feng L, Wang H, et al. Spray characteristics of gasoline/PODE and diesel/PODE blends in a constant volume chamber. *Appl Therm Eng* 2019;159:113850.

[95] Ren Y, Wang F, Huang Z Densities, Surface Tensions, and Viscosities of Diesel–Oxygenate Mixtures at the Temperature 301.15 K. *Energy Fuels* 2007;21:1628-30.

[96] Lešnik L, Biluš I The effect of rapeseed oil biodiesel fuel on combustion, performance, and the emission formation process within a heavy-duty DI diesel engine. *Energy conversion and management* 2016;109:140-52.

[97] Kumaran KT, Sharma I Catalytic pyrolysis of plastic waste: A Review. 2020:1-4.

- [98] Singh TS, Verma TN, Singh HN A lab scale waste to energy conversion study for pyrolysis of plastic with and without catalyst: Engine emissions Ensaying study. *Fuel* 2020;277:118176.
- [99] Kim J, Lee J, Kim K Numerical study on the effects of fuel viscosity and density on the injection rate performance of a solenoid diesel injector based on AMESim. *Fuel* 2019;256:115912.
- [100] Achebe CH, Ogunedo B, Chukwuneke JL, Anosike NB Analysis of diesel engine injector nozzle spray characteristics fueled with residual fuel oil. *Heliyon* 2020;6:e04637.
- [101] Santaweek C, Janyalertadun A The production of fuel oil by conventional slow pyrolysis using plastic waste from a municipal landfill. *International Journal of Environmental Science and Development* 2017;8:168.
- [102] Kurniawati D, Putra N, Abdullah N, Hakim II, Nurrokhmat A An experimental analysis of diesel fuel produced from HDPE (high-density polyethylene) waste using thermal and catalytic pyrolysis with passive heat pipe cooling system. *Thermal Science and Engineering Progress* 2021;23:100917.
- [103] Hahladakis JN, Velis CA, Weber R, Iacovidou E, Purnell P An overview of chemical additives present in plastics: Migration, release, fate and environmental impact during their use, disposal and recycling. *J Hazard Mater* 2018;344:179-99.
- [104] Marcilla A, Beltrán MI, Navarro R Thermal and catalytic pyrolysis of polyethylene over HZSM5 and HUSY zeolites in a batch reactor under dynamic conditions. *Applied Catalysis B: Environmental* 2009;86:78-86.
- [105] Su J, Fang C, Yang M, et al. Catalytic pyrolysis of waste packaging polyethylene using AlCl₃-NaCl eutectic salt as catalyst. *J Anal Appl Pyrolysis* 2019;139:274-81.
- [106] Kizza R, Banadda N, Seay J Qualitative and energy recovery potential analysis: plastic-derived fuel oil versus conventional diesel oil. *Clean Technologies and Environmental Policy* 2022;24:789-800.
- [107] Tulashie SK, Boadu EK, Dapaah S Plastic waste to fuel via pyrolysis: A key way to solving the severe plastic waste problem in Ghana. *Thermal Science and Engineering Progress* 2019;11:417-24.
- [108] Mangesh VL, Padmanabhan S, Tamizhdurai P, Ramesh A Experimental investigation to identify the type of waste plastic pyrolysis oil suitable for conversion to diesel engine fuel. *J Clean Prod* 2020;246:119066.
- [109] Lešnik L, Kegl B, Torres-Jiménez E, Cruz-Peragón F, Mata C, Biluš I Effect of the in-cylinder back pressure on the injection process and fuel flow characteristics in a common-rail diesel injector using GTL fuel. *Energies* 2021;14:452.

- [110] Lešnik L, Kegl B, Bombek G, Hočevár M, Biluš I The influence of in-nozzle cavitation on flow characteristics and spray break-up. *Fuel* 2018;222:550-60.
- [111] Cristofaro M, Edelbauer W, Koukouviniš P, Gavaises M A numerical study on the effect of cavitation erosion in a diesel injector. *Appl Math Model* 2020;78:200-16.
- [112] Yu W, Yang W, Zhao F Investigation of internal nozzle flow, spray and combustion characteristics fueled with diesel, gasoline and wide distillation fuel (WDF) based on a piezoelectric injector and a direct injection compression ignition engine. *Appl Therm Eng* 2017;114:905-20.
- [113] Torelli R, Som S, Pei Y, Zhang Y, Traver M Influence of fuel properties on internal nozzle flow development in a multi-hole diesel injector. *Fuel* 2017;204:171-84.
- [114] Jiang G, Zhang Y, Wen H, Xiao G Study of the generated density of cavitation inside diesel nozzle using different fuels and nozzles. *Energy Conversion and Management* 2015;103:208-17.
- [115] Altin O, Eser S Carbon deposition from thermal stressing of petroleum fuels. 2004;228.
- [116] Schwarz P, Blume M, Weiß L, Wensing M, Skoda R 3D simulation of a ballistic direct injection cycle for the assessment of fuel property effects on cavitating injector internal flow dynamics and primary breakup. *Fuel* 2022;308:121775.
- [117] Battistoni M, Grimaldi CN Numerical analysis of injector flow and spray characteristics from diesel injectors using fossil and biodiesel fuels. *Appl Energy* 2012;97:656-66.
- [118] Celik IB, Ghia U, Roache PJ, Freitas CJ Procedure for estimation and reporting of uncertainty due to discretization in CFD applications. *Journal of fluids Engineering-Transactions of the ASME* 2008;130.
- [119] Roache PJ Perspective: a method for uniform reporting of grid refinement studies. 1994.
- [120] Battistoni M, Som S, Powell CF Highly resolved Eulerian simulations of fuel spray transients in single and multi-hole injectors: Nozzle flow and near-exit dynamics. *Fuel* 2019;251:709-29.
- [121] Wei M, Gao Y, Yan F, et al. Experimental study of cavitation formation and primary breakup for a biodiesel surrogate fuel (methyl butanoate) using transparent nozzle. *Fuel* 2017;203:690-9.
- [122] Yin J, Zhang Y, Zhu J, Lv L, Tian L An experimental and numerical study on the dynamical behaviors of the rebound cavitation bubble near the solid wall. *Int J Heat Mass Transfer* 2021;177:121525.

- [123] Rodríguez E, Palos R, Gutiérrez A, Vela FJ, Arandes JM, Bilbao J Effect of the FCC equilibrium catalyst properties and of the cracking temperature on the production of fuel from HDPE pyrolysis waxes. *Energy Fuels* 2019;33:5191-9.
- [124] Butler E, Devlin G, Meier D, McDonnell K A review of recent laboratory research and commercial developments in fast pyrolysis and upgrading. *Renewable and sustainable energy reviews* 2011;15:4171-86.
- [125] de Almeida CF, Maciel VG, Tsambe M, de Abreu Cybis, Luiz Fernando Environmental assessment of a bi-fuel thermal power plant in an isolated power system in the Brazilian Amazon region. *J Clean Prod* 2017;154:41-50.
- [126] Mohammed H, Sadeek S, Mahmoud AR, Zaky D Comparison of AAS, EDXRF, ICP-MS and INAA performance for determination of selected heavy metals in HFO ashes. *Microchemical Journal* 2016;128:1-6.
- [127] Pei X, Elbaz AM, Jiang L, AlAhmadi KM, Saxena S, Roberts WL Heavy Fuel Oil Combustion Characteristics Evaluation in Various Swirling Flow Conditions. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power* 2021;143.
- [128] Faisal SH, Naeem NK, Jassim AA Energy and exergy study of Shatt Al-Basra gas turbine power plant. 2021;1773:012020.
- [129] Soto F, Marques G, Soto-Izquierdo L, et al. Performance and regulated emissions of a medium-duty diesel engine fueled with biofuels from sugarcane over the European steady cycle (ESC). *Fuel* 2021;292:120326.
- [130] Muralidharan V, Vierling M Enhancing Gas Turbine Operation With Heavy Fuel Oil. 2013;35161:V001T03A016.
- [131] Chiaramonti D, Oasmaa A, Solantausta Y Fast pyrolysis oil for power generation. 2006;42371:325-32.
- [132] Pawar A, Panwar NL Influence of Pyrolysis Technologies on Biofuel Production and Its Physicochemical Properties: A Review. *Smart Technologies for Energy, Environment and Sustainable Development, Vol 1* 2022:569-600.
- [133] Pinto F, Costa P, Gulyurtlu I, Cabrita I Pyrolysis of plastic wastes: 2. Effect of catalyst on product yield. *J Anal Appl Pyrolysis* 1999;51:57-71.
- [134] Palomar-Torres A, Torres-Jimenez E, Kegl B, Bombek G, Volmajer-Valh J, Lešnik L Catalytic pyrolysis of plastic wastes for liquid oils' production using ZAP USY zeolite as a catalyst. *International Journal of Environmental Science and Technology* 2022:1-14.
- [135] Jamradloedluk J, Lertsatitthanakorn C Characterization and utilization of char derived from fast pyrolysis of plastic wastes. *Procedia Engineering* 2014;69:1437-42.

- [136] Rahmat NG, Fatriansyah JF, Dhaneswara D, Kaban APS Study of Zeolite Usage in Thermal Degradation Process of Polypropylene Pyrolysis. 2020;1000:331-6.
- [137] Barrado de Salís M Central de Turbinas a gas basada en fuel pesado. 2015.
- [138] Smith BA Symposium on drying and air conditioning rotary dryers. Industrial & Engineering Chemistry 1938;30:993-5.
- [139] KELLY JL, O'DONNELL P Residence time model for rotary drums. 1977.
- [140] Kamke FA, Wilson JB Computer simulation of a rotary dryer. Part II: Heat and mass transfer. AIChE J 1986;32:269-75.
- [141] Ghasemi A, Hasankhoei A, Parsapour G, Razi E, Banisi S A combined physical and DEM modelling approach to improve performance of rotary dryers by modifying flights design. Drying Technol 2021;39:548-65.
- [142] Priessen J, Kawka T, Alisic J, Behrens M, Schultz HJ Rotary drums with sectional internals: Experimental investigation on the influence of section number and section length. Powder Technol 2021;386:262-74.
- [143] Souza G, Avendaño PS, Francisquetti M, Ferreira F, Duarte CR, Barrozo M Modeling of heat and mass transfer in a non-conventional rotary dryer. Appl Therm Eng 2021;182:116118.
- [144] Perazzini H, Perazzini MT, Freire FB, Freire FB, Freire JT Modeling and cost analysis of drying of citrus residues as biomass in rotary dryer for bioenergy. Renewable Energy 2021;175:167-78.
- [145] Chaanaoui M, Abderafi S, Vaudreuil S, Bounahmidi T Prototype of phosphate sludge rotary dryer coupled to a parabolic trough collector solar loop: Integration and experimental analysis. Solar Energy 2021;216:365-76.
- [146] Huang Z, Weng Y, Fu N, Fu Z, Li D, Chen XD Modeling and simulation of a co-current rotary dryer. International Journal of Food Engineering 2016;12:189-94.
- [147] Gomez-de la Cruz, Francisco J, Casanova-Pelaez PJ, Palomar-Carnicero JM, Cruz-Peragón F Modeling of olive-oil mill waste rotary dryers: green energy recovery systems. Appl Therm Eng 2015;80:362-73.
- [148] Bacelos MS, Jesus C, Freire JT Modeling and drying of carton packaging waste in a rotary dryer. Drying Technol 2009;27:927-37.
- [149] Rousselet Y, Dhir VK Numerical modeling of a co-current cascading rotary dryer. Food Bioprod Process 2016;99:166-78.

- [150] Akpinar EK, Sarsilmaz C Energy and exergy analyses of drying of apricots in a rotary solar dryer. *International Journal of Exergy* 2004;1:457-74.
- [151] Peinado D, De Vega M, García-Hernando N, Marugán-Cruz C Energy and exergy analysis in an asphalt plant's rotary dryer. *Appl Therm Eng* 2011;31:1039-49.
- [152] Kaveh M, Abbaspour-Gilandeh Y, Chen G Drying kinetic, quality, energy and exergy performance of hot air-rotary drum drying of green peas using adaptive neuro-fuzzy inference system. *Food Bioprod Process* 2020;124:168-83.
- [153] Gómez-de la Cruz, Francisco J, Casanova-Peláez PJ, López-García R, Cruz-Peragón F Review of the drying kinetics of olive oil mill wastes: Biomass recovery. *BioResources* 2015;10:6055-80.
- [154] García Martín JF, Cuevas M, Feng C, Álvarez Mateos P, Torres García M, Sánchez S Energetic valorisation of olive biomass: Olive-tree pruning, olive stones and pomaces. *Processes* 2020;8:511.
- [155] Pattara C, Cappelletti GM, Cichelli A Recovery and use of olive stones: commodity, environmental and economic assessment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2010;14:1484-9.
- [156] Mediavilla I, Barro R, Borjabad E, Peña D, Fernández MJ Quality of olive stone as a fuel: Influence of oil content on combustion process. *Renewable Energy* 2020;160:374-84.
- [157] Mata-Sánchez J, Pérez-Jiménez JA, Díaz-Villanueva MJ, Serrano A, Núñez-Sánchez N, López-Giménez FJ Statistical evaluation of quality parameters of olive stone to predict its heating value. *Fuel* 2013;113:750-6.
- [158] Mata-Sánchez J, Pérez-Jiménez JA, Díaz-Villanueva MJ, Serrano A, Núñez-Sánchez N, López-Giménez FJ Development of olive stone quality system based on biofuel energetic parameters study. *Renewable Energy* 2014;66:251-6.
- [159] AENOR, UNE-EN 14961-2 Biocombustibles sólidos. Especificaciones y clases de combustibles. Parte 2: Pelets de madera para uso no industrial, 2012.
- [160] Gómez-de la Cruz, Francisco J, Casanova-Peláez PJ, Palomar-Carnicero JM, Cruz-Peragón F Drying kinetics of olive stone: A valuable source of biomass obtained in the olive oil extraction. *Energy* 2014;75:146-52.
- [161] Gómez-de la Cruz, Francisco J, Palomar-Carnicero JM, Casanova-Peláez PJ, Cruz-Peragón F Experimental determination of effective moisture diffusivity during the drying of clean olive stone: Dependence of temperature, moisture content and sample thickness. *Fuel Process Technol* 2015;137:320-6.

- [162] Cuevas M, Martínez-Cartas ML, Pérez-Villarejo L, Hernández L, García-Martín JF, Sánchez S Drying kinetics and effective water diffusivities in olive stone and olive-tree pruning. *Renewable Energy* 2019;132:911-20.
- [163] Gómez-de la Cruz, Francisco J, Casanova-Peláez PJ, Palomar-Carnicero JM, Cruz-Peragón F Characterization and analysis of the drying real process in an industrial olive-oil mill waste rotary dryer: A case of study in Andalusia. *Appl Therm Eng* 2017;116:1-10.
- [164] Gómez-de la Cruz, Francisco J, Casanova-Peláez PJ, Cruz-Peragón F, Palomar-Carnicero JM New Experimental Rotary Dryer of Olive Stone: Design, Control and Modeling. *Waste and biomass valorization* 2018;9:443-9.
- [165] Holman JP *Experimental methods for engineers*. 2012.
- [166] Ademiluyi FT, Abowei M, Puyate YT, Achinewhu SC Effects of drying parameters on heat transfer during drying of fermented ground cassava in a rotary dryer. *Drying Technol* 2010;28:550-61.
- [167] Yilmazoglu MZ, Amirabedin E 3E analysis of a solar assisted rotary type coal dryer. *International Journal of Renewable Energy Research* 2012;2:16-22.
- [168] Aghbashlo M, Mobli H, Rafiee S, Madadlou A A review on exergy analysis of drying processes and systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2013;22:1-22.
- [169] Bejan A *Advanced engineering thermodynamics*. : John Wiley & Sons, 2016.
- [170] Xu Q, Pang S Mathematical modeling of rotary drying of woody biomass. *Drying Technol* 2008;26:1344-50.
- [171] Göğüş YA, Çamdalı Ü, Kavsaoglu MŞ Exergy balance of a general system with variation of environmental conditions and some applications. *Energy* 2002;27:625-46.
- [172] Mujumdar AS *The making of the handbook of industrial drying*. *Drying Technol* 2014;32:627-8.
- [173] Rong W, Li B, Liu P, Qi F Exergy assessment of a rotary kiln-electric furnace smelting of ferronickel alloy. *Energy* 2017;138:942-53.
- [174] Del Giudice A, Acampora A, Santangelo E, et al. Wood chip drying through the using of a mobile rotary dryer. *Energies* 2019;12:1590.

ANEXOS:

PUBLICACIONES

ANEXO 1: Publicaciones referidas al Capítulo 1

ANEXO 1.1:

Palomar-Torres, A., Torres-Jiménez, E., Cruz-Peragón, Fernando A., & Bombek, G. Revisión bibliográfica sobre aditivos para mezclas de combustibles bioetanol-gasoil. *XXIII Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica. Octubre 2021.*

“En este trabajo se presenta una revisión bibliográfica actualizada sobre los principales aditivos que se utilizan en la mezcla bioetanol-gasoil. Este tipo de mezclas no han sido tradicionalmente usadas para alimentar motores de encendido por compresión, ya que el bioetanol es un biocombustible cuyas propiedades son mucho más parecidas a las de la gasolina. Numerosos trabajos han demostrado las ventajas de añadir bajas concentraciones de etanol al gasoil. Las principales conclusiones de estos estudios previos están relacionadas con la reducción de las emisiones contaminantes y el impulso de las energías renovables. Estas mezclas de combustibles necesitan aditivos para poder usarse de forma eficiente en motores diésel, ya que el bioetanol empeora alguna de las propiedades físico-químicas del gasoil. El principal inconveniente que presenta la adición de etanol al gasoil está relacionado con la baja miscibilidad, lo que puede llevar a inyectar en la cámara de combustión los combustibles puros en distintos momentos del funcionamiento del motor. En este artículo se muestra un análisis de los rangos de miscibilidad de la mezcla de combustibles propuesta y de las opciones actuales para solucionar este problema.”

ISSN 0212-5072

Tipo de publicación: Comunicación en Acta de Congreso con revisión por pares.

ANEXO 1.2:

Palomar-Torres, A., Torres-Jiménez, E., Bolaños-Jiménez, R., & Bombek, G. Experimental study of the physicochemical properties of new biofuels. *18th International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'20) Granada (Spain), 1st to 2nd April 2020. Renewable Energy and Power Quality Journal (RE&PQJ)*

“In this work, some physical properties of several biofuels, which are used in compression ignition engines, of which no reference publications have been found, are experimentally obtained. These properties are essential when simulating engine processes such as injection and fuel spray. The measured properties are density and surface tension. Density is measured by the use of a pycnometer and surface tension by means of commercial equipment (Krüss-EasyDyne). Diesel fuel, biodiesel, as well as biodiesel-ethanol blends are Ensayoed. Density and surface tension are quantified, verifying that the density is proportional to the concentration of each fuel in the blend. Nevertheless, this is not the case of the surface tension, which fits a second-order polynomial.”

ISSN 2172-038 X, Volume No.18, June 2020

Tipo de publicación: Artículo de investigación en revista indexada en SCOPUS.

ANEXO 2: Publicación referida al Capítulo 2

L. Robles-Lorite, A. Palomar-Torres, E. Torres-Jiménez, R. Dorado-Vicente, L. Lešnik. Geometrical characterization of a solenoid common-rail injector for modelling the injection process. *XV Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica. Madrid, España, 22-24 de noviembre de 2022.*

“The injection process plays an important role in optimizing the performance and emissions of an internal combustion engine. This kind of optimization becomes essential when a new biofuel is under study. When a common-rail system is analysed, the modelling of the injection system is focused on the injector. In this case, an accurate simulation of the injection process requires determining geometrical data of the internal ducts and volumes of the injector. Nevertheless, this information is not easy to get because it is not available from the manufacturer. For this reason, researchers have developed several techniques to overcome this problem; for example, the silicone methodology was originally developed to determine the internal geometry of an injector nozzle. In the present paper, we apply this methodology, together with conventional measurement techniques, to determine the internal geometry of a solenoid common-rail injector with the target of providing the necessary data for an accurate simulation of the injection process. Based on a comparison using high-quality results obtained from X-ray Ensayos, we concluded that the accuracy of the silicone methodology is of confidence.”

Tipo de publicación: Artículo de investigación en revista indexada en SCOPUS (pendiente de publicación).

ANEXO 3: Publicaciones referidas al Capítulo 3

ANEXO 3.1:

Palomar-Torres, A., Torres-Jimenez, E., Kegl, B., Bombek, G., Volmajer-Valh, J., & Lešnik, L. (2022). Catalytic pyrolysis of plastic wastes for liquid oils' production using ZAP USY zeolite as a catalyst. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 1-14.

"The use of plastic is increasing every year and is a major environmental problem. A possible solution to reduce plastic pollution is to convert it into synthetic fuel, which can be achieved by a pyrolysis process. The catalyst used can influence the quality of the pyrolysis products. In the present work, we Ensayoed the influence of ZAP USY zeolite on the quality and quantity of pyrolysis oils produced from high-density polyethylene, low-density polyethylene, polypropylene, and polystyrene plastic from municipal waste. The pyrolysis process was carried out in a laboratory-scale single batch fixed bed pyrolysis reactor at the temperature of about $400\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 30\text{ }^{\circ}\text{C}$. The mass ratio of plastic and catalyst was 10:1. The obtained results show that the use of a catalyst reduces the pyrolysis oil production and solid residues' formation. The use of a catalyst also decreases the calorific value, density, surface tension, and kinematic viscosity of the obtained oils slightly. The use of a catalyst increases the plastic degradation rate, which is evident from the result of the carbon number distribution. The pyrolysis oils obtained by catalytic pyrolysis contain a higher amount of shorter chain molecules than oils obtained by thermal pyrolysis of waste plastic. The obtained results of the analyzed pyrolysis oils indicate that they have a high potential for possible use in internal combustion engines as an additive to conventional fuels, or as their substitute."

<https://doi.org/10.1007/s13762-022-04023-z>

Tipo de publicación: Artículo de investigación en revista indexada en JCR. (Q3)

ANEXO 3.2:

Lešnik, L., Palomar-Torres, A., Torres-Jiménez, E., Mata, C., Valh, J. V., Kevorkijan, L., & Biluš, I. (2022). The effect of HDPE and LDPE pyrolytic oils on cavitation formation in a common-rail diesel injector. *Fuel*, 330, 125581.

"Plastic production and usage increase every year due to its practicality, adaptability, and low-cost production. The problem with plastic arises when it becomes waste and needs to be treated. Most of the plastic we use is produced from petrochemical material that can be used in resource recovery processes like pyrolysis to produce various materials. One of the pyrolysis process products is pyrolytic oil, whose properties are similar to conventional fuels. Minor differences in fuel properties can influence the injection process, in-nozzle flow condition, spray formation and break-up, the combustion process, etc. The presented paper aims to study the influence of pyrolytic oil's properties on cavitation formation in the injection nozzle of a common-rail injector. First, the pyrolytic oils were obtained from waste high- and low-density polyethylene using a pyrolysis reactor. Afterwards, the oils were characterized and implemented in the AVL FIRE computation program for studying their influence on cavitation formation in the injection nozzle hole. The obtained results indicate slight differences in fuel properties that influence cavitation formation and spread in the injection hole, which further influence conditions at the exit of the injection hole. The lower lower viscosity of pyrolytic oils influences lower friction in the fuel nozzle flow. The lower density and viscosity of pyrolytic oils promotes cavitation formation, advance time of it appearance at injection hole exit and influence the shorter presence of cavitation in the needle closing phase."

<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.125581>

Tipo de publicación: Artículo de investigación en revista indexada en JCR. (Q1)

ANEXO 3.3:

Palomar-Torres, A., Lesnik, L., Torres-Jiménez, E., & Bombek, G. (2022). Fast Pyrolysis oil from plastics waste as a Fuel for Gas Turbine Power Plants. *20th International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'22) Vigo (Spain), 27th to 29th July 2022. Renewable Energy and Power Quality Journal (RE&PQJ)*

“Plastic production and usage increase every year due to its low cost, practicality, and flexibility. Despite the advantages of plastics as a raw material, it represents a serious environmental problem when it becomes waste. Most of the plastic is produced from petrol. Its chemical composition provides the opportunity to be transformed into a fuel via a pyrolysis process, with or without a catalyst. The pyrolysis process yields solid, liquid and gas fractions. The liquid fraction has properties similar to those of conventional fuels and can be used in internal combustion engines. However, although fast pyrolysis is cheaper, it produces lower quality products (longer carbon chains) not suitable for these types of engines. In the present paper, main properties of oils from fast pyrolysis are analysed and compared to those of Heavy Fuel Oils (HFO) to demonstrate that they represent a feasible alternative to decrease the impact of plastics in the environment and to obtain an alternative fuel to feed a power plant.”

ISSN 2172-038 X, Volume No.20, September 2022

Tipo de publicación: Artículo de investigación en revista indexada en SCOPUS.

ANEXO 4: Publicación referida al Capítulo 4

Gómez-de la Cruz, F. J., Palomar-Torres, A., Palomar-Carnicero, J. M., & Cruz-Peragón, F. (2022). Energy and exergy analysis during drying in rotary dryers from finite control volumes: Applications to the drying of olive stone. *Applied Thermal Engineering*, 200, 117699.

“Nowadays, the design, control and development of rotary dryers are based on the study of the complete equipment. Rotary dryers are treated as a black box where only inlet and outlet parameters are known. This implies the need to know the main interactions of mass, energy and exergy throughout the trommel to help improve the drying process. In this paper, we carried out an analysis of energy and exergy during drying of olive stone from finites control volumes in an experimental rotary dryer. Mass, energy and exergy balances are applied to each control volume in the drying air. The design of experiments is based on three initial drying air temperatures (210 °C, 180 °C and 150 °C) and three drying air flows (576 kg/h, 425 kg/h and 280 kg/h), with a byproduct mass flow of 40 kg/h and a rotational speed of 5.5 rpm. The results indicated that olive stone moisture content was reduced to less than half in the first third of the trommel where a big thermal shock is produced due to the interaction between the by-product and the drying air flow at high moisture contents and high temperatures, respectively. This fact led to the highest exergy destruction values, thereby diminishing the flow exergies for the following control volumes. Heat losses were considerable in all equipment, especially in the first two control volumes. Furthermore, drying process was analyzed from the enersgetic, exergetic and drying efficiencies and the unit energy consumption.”

<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117699>

Tipo de publicación: Artículo de investigación en revista indexada en JCR. (Q1)

