

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA



**ESTUDIO DEL EFECTO DE LAS PROPIEDADES DE  
MEZCLAS TERNARIAS DE COMBUSTIBLES EN EL  
PROCESO DE MEZCLA EN UN MOTOR DIÉSEL**

POR

**FLOR DE LIS LARAMI CORRAL GÓMEZ**

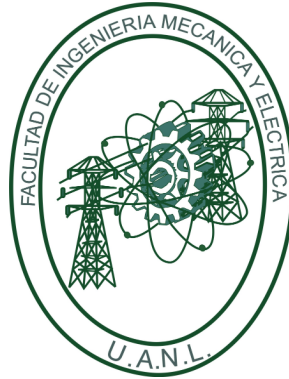
COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA  
CON ORIENTACIÓN EN ENERGÍAS TÉRMICA Y RENOVABLE

ENERO 2018

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



**ESTUDIO DEL EFECTO DE LAS PROPIEDADES DE  
MEZCLAS TERNARIAS DE COMBUSTIBLES EN EL  
PROCESO DE MEZCLA EN UN MOTOR DIÉSEL**

POR

**FLOR DE LIS LARAMI CORRAL GÓMEZ**

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA  
CON ORIENTACIÓN EN ENERGÍAS TÉRMICA Y RENOVABLE

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, NUEVO LEÓN, MÉXICO. ENERO 2018

Universidad Autónoma de Nuevo León  
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica  
Subdirección de Estudios de Posgrado

Los miembros del Comité de Tesis recomendamos que la Tesis «ESTUDIO DEL EFECTO DE LAS PROPIEDADES DE MEZCLAS TERNARIAS DE COMBUSTIBLES EN EL PROCESO DE MEZCLA EN UN MOTOR DIÉSEL», realizada por la alumna Flor de Lis Larami Corral Gómez, con número de matrícula 1836902, sea aceptada para su defensa como requisito parcial para obtener el grado de Maestría en Ciencias de la Ingeniería con orientación en Energías Térmica y Renovable.

El Comité de Tesis



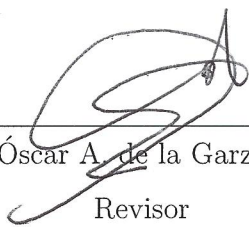
Dr. Fausto A. Sánchez Cruz

Director



MC. Jaime Armendáriz Velázquez

Co-Director



Dr. Óscar A. de la Garza León

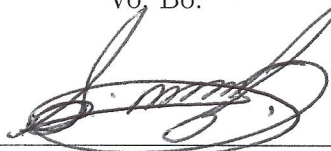
Revisor



Dr. Simón Martínez Martínez

Revisor

Vo. Bo.



Dr. Simón Martínez Martínez

Subdirector de Estudios de Posgrado

San Nicolás de los Garza, Nuevo León, enero de 2018

*Lo difícil atrae, lo imposible  
seduce, lo complicado asusta y lo  
extremadamente complicado  
enamora.*

---

*Paulo Coelho*

# AGRADECIMIENTOS

---

A mis padres, Vicente Corral Barreira y Flor de Lis Gómez Blázquez, quienes han dado todo por mí. A quienes agradezco por inculcarme el amor por el estudio y la superación, por impulsarme a alcanzar mis sueños y enseñarme que un logro conlleva a un gran número de obstáculos y dificultades que con esmero son fácilmente superados. Especialmente les agradezco por brindarme su apoyo incondicional durante esta etapa de mi vida que culmina con este trabajo de maestría.

A mis hermanas, Erika Judit Corral Gómez y Rubí Corral Gómez, por ser una parte importante en mi vida.

A mi novio, amigo y güerito preferido, Guillermo Rubio Gómez, por estar presente tanto en lo bueno como en lo malo y por su gran apoyo en los momentos difíciles, por tantas historias y anécdotas que hemos coleccionado con el paso de los años.

Al Dr. Fausto A. Sánchez Cruz y al MC. Jaime Armendáriz Velázquez por el apoyo prestado durante la realización de esta tesis y a la excelente disponibilidad para la resolución de los problemas que se han ido presentado.

Al Dr. Simón Martínez Martínez por su soporte como Subdirector de Estudios de Posgrado y por permitirme continuar mis estudios dentro del Grupo de Energías Térmicas y Renovable (GETR).

Al Dr. Fernando J. Castillo García por sus consejos, tutorías y apoyo incondicional durante estos años.

---

Al Grupo de Investigación en Procesos Energéticos y Medioambientales (GPEM) de la Universidad de Castilla – La Mancha, en especial al Dr. Octavio Armas Vergel, cuya buena relación y compromiso con otros grupos de investigación promueven la movilidad internacional de estudiantes.

A todos los doctores y maestros del grupo de investigación, MC. Miguel García, Dr. Santos Méndez, Dr. Arturo Morales, Dr. Óscar A. de la Garza, Dr. Azael J. Cortés y MC. Hugo G. Ramírez por todas sus enseñanzas.

A mis amigos y amigas de España, en especial a Estefania Tubilla, María Ruíz, Lara Barba, Leticia Calvo y Elena Aguilera por ser soporte y apoyo allá donde voy.

A mis compañeros y amigos que me han acompañado en este tiempo en México, Hernán A. Ramírez, Luis F. Rúa, Alfredo Jiménez, Víctor E. Sánchez, Juan Carlos Solís, Luis F. Fong, Alex N. de Lucio, Sergio R. Borrego, Mayra L. Bustos, Adriana Sanfiel y a todos mis demás compañeros, gracias por sus aportes y amistad.

A la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (FIME) por el apoyo brindado a lo largo de este programa académico. Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo otorgado a través de la beca número 596352 desde enero de 2016 a diciembre 2017 y por la ayuda económica proporcionado a través del proyecto de ciencia básica número 239943.

Al Programa para el Desarrollo Profesional Docente, para el Tipo Superior (PRODEP) por el apoyo a la Red “Investigación e Innovación en Tecnología Energética”, para la realización de este trabajo, mediante el proyecto de Redes Temáticas de Colaboración Académica 2015 titulado “Uso y Aprovechamiento Energético de Biocombustibles en Motores de Combustión interna”.

# ÍNDICE GENERAL

---

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1. Introducción</b>                                    | <b>1</b>  |
| 1.1. Motivación . . . . .                                 | 2         |
| 1.2. Antecedentes . . . . .                               | 5         |
| 1.3. Hipótesis . . . . .                                  | 12        |
| 1.4. Objetivos . . . . .                                  | 13        |
| 1.4.1. Objetivo General . . . . .                         | 13        |
| 1.4.2. Objetivos Específicos . . . . .                    | 13        |
| <b>2. Marco teórico</b>                                   | <b>15</b> |
| 2.1. El proceso de inyección en MEC . . . . .             | 16        |
| 2.1.1. Sistema de inyección diésel . . . . .              | 16        |
| 2.1.1.1. Tipos de sistemas de inyección directa . . . . . | 19        |
| 2.1.1.2. El sistema common rail . . . . .                 | 20        |
| 2.1.2. Tasa de inyección . . . . .                        | 23        |
| 2.1.2.1. Velocidad y área efectivas . . . . .             | 24        |

---

|  |           |
|--|-----------|
| 2.1.3. El chorro de inyección . . . . .  | 25        |
| 2.1.3.1. Proceso de atomización . . . . .  | 25        |
| 2.1.3.2. Regímenes de atomización . . . . .  | 26        |
| 2.1.3.3. Análisis dimensional del proceso de atomización pri-<br>maria . . . . .                         | 27        |
| 2.1.3.4. Mecanismos que afectan en la atomización de la vena<br>líquida o atomización primaria . . . . . | 30        |
| 2.1.3.5. Parámetros característicos de los chorros de inyección  | 31        |
| 2.2. Combustibles . . . . .  | 37        |
| 2.2.1. Diésel . . . . .  | 37        |
| 2.2.2. Biocombustibles . . . . .   | 38        |
| 2.2.2.1. Biodiésel . . . . .   | 41        |
| 2.2.2.2. Bioetanol . . . . .   | 45        |
| 2.3. Correlaciones para el cálculo de propiedades de combustibles . . . . .                              | 47        |
| 2.3.1. Viscosidad cinemática . . . . .   | 48        |
| 2.3.2. Tensión superficial . . . . .   | 49        |
| 2.3.3. Densidad . . . . .  | 50        |
| 2.3.4. Índice de cetano . . . . .  | 51        |
| <b>3. Herramientas experimentales</b>  | <b>52</b> |
| 3.1. Instalación experimental: Maqueta de visualización a volumen constante                              | 53        |
| 3.1.1. Cámara a volumen constante . . . . .  | 54        |



---

|  |           |
|--|-----------|
| 3.1.2. Sistema de inyección . . . . .  | 55        |
| 3.2. Técnica óptica: Iluminación directa por dispersión MIE . . . . .        | 57        |
| 3.2.1. Obtención de la resolución espacial . . . . .                         | 58        |
| 3.2.2. Procesamiento de imágenes . . . . .                                   | 59        |
| 3.3. Método de destilación a presión atmosférica . . . . .                   | 62        |
| 3.4. Método de obtención de gravedad específica . . . . .                    | 65        |
| <b>4. Metodología</b>  | <b>68</b> |
| 4.1. Definición y elaboración de las mezclas . . . . .                       | 69        |
| 4.2. Estudio de estabilidad de las mezclas . . . . .                         | 71        |
| 4.3. Obtención de las curvas de destilación ASTM D86-04 . . . . .            | 74        |
| 4.4. Obtención de la gravedad específica de los combustibles . . . . .       | 77        |
| 4.5. Cálculo de las propiedades de los combustibles . . . . .                | 78        |
| 4.6. Evaluación de las mezclas . . . . .                                     | 79        |
| 4.7. Diseño de la matriz de experimentos . . . . .                           | 80        |
| 4.8. Experimentación y procesamiento de las imágenes . . . . .               | 82        |
| <b>5. Resultados</b>   | <b>84</b> |
| 5.1. Imágenes adquiridas en el proceso de inyección . . . . .                | 85        |
| 5.2. Imágenes procesadas con el software . . . . .                           | 86        |
| 5.3. Efecto de las propiedades en la penetración del chorro . . . . .        | 89        |
| 5.4. Efecto de las propiedades en el ángulo de apertura del chorro . . . . . | 92        |

|  |            |
|--|------------|
| ÍNDICE GENERAL   | X          |
| <hr/>  |            |
| <b>6. Conclusiones y trabajos futuros</b>                  | <b>96</b>  |
| 6.1. Conclusiones . . . . .                                | 97         |
| 6.2. Trabajos futuros . . . . .                            | 99         |
| <b>A. Cromatograma biodiésel de aceite usado de cocina</b> | <b>101</b> |
| <b>B. Datos destilaciones ASTM D86-04 combustibles</b>     | <b>103</b> |
| <b>Referencias</b>   | <b>119</b> |

# ÍNDICE DE FIGURAS

---

|   |    |
|---|----|
| 1.1. Evolución histórica de la norma EURO. . . . .                      | 3  |
| 1.2. Propiedades de mezclas de diésel-etanol. . . . .                   | 8  |
| 1.3. Penetración del chorro de mezclas de diésel-etanol. . . . .        | 9  |
| 1.4. Ángulo de apertura del chorro de mezclas de diésel-etanol. . . . . | 10 |
| 2.1. Sistema de inyección directa e indirecta. . . . .                  | 18 |
| 2.2. Diagrama del sistema de inyección common rail. . . . .             | 21 |
| 2.3. Funcionamiento de un inyector common rail. . . . .                 | 22 |
| 2.4. Definición de velocidad y área efectiva. . . . .                   | 24 |
| 2.5. Régimen de atomización. . . . .                                    | 28 |
| 2.6. Parámetros macroscópicos del chorro de combustible. . . . .        | 32 |
| 2.7. Proceso producción de bioetanol. . . . .                           | 46 |
| 3.1. Maqueta de visualización a volumen constante. . . . .              | 53 |
| 3.2. Cámara a volumen constante. . . . .                                | 54 |
| 3.3. Esquema del sistema de inyección. . . . .                          | 55 |

---

|   |    |
|---|----|
| 3.4. Técnica óptica: Iluminación directa por dispersión MIE. . . . .  | 57 |
| 3.5. Obtención de la relación <i>pixel/mm</i> . . . . .   | 59 |
| 3.6. Muestra del procesamiento de imágenes. . . . .   | 60 |
| 3.7. Simulación del proceso de inyección para la obtención de la incertidumbre de medida. . . . .                                       | 62 |
| 3.8. Unidad de destilación discontinua de laboratorio a presión ambiente utilizada. . . . .   | 63 |
| 3.9. Lectura escala hidrómetro. . . . .   | 66 |
| 4.1. Fotos de los fenómenos de separación de fases de las mezclas. . . . .  | 72 |
| 4.2. Relación de separación de fases de la mezcla según la proporción de biodiésel para una proporción fija del 5 % de etanol. . . . .  | 73 |
| 4.3. Relación de separación de fases de la mezcla según la proporción de biodiésel para una proporción fija del 10 % de etanol. . . . . | 73 |
| 4.4. Relación de separación de fases de la mezcla según la proporción de biodiésel para una proporción fija del 20 % de etanol. . . . . | 74 |
| 4.5. Curvas de destilación ASTM D86-04 de los combustibles puros. . . . .   | 75 |
| 4.6. Curvas de destilación ASTM D86-04 de las mezclas con una porción fija del 5 % de etanol. . . . .                                   | 76 |
| 4.7. Curvas de destilación ASTM D86-04 de las mezclas con una porción fija del 10 % de etanol. . . . .                                  | 76 |
| 4.8. Curvas de destilación ASTM D86-04 de las mezclas con una porción fija del 20 % de etanol. . . . .                                  | 77 |

---

|   |     |
|---|-----|
| 5.1. Imágenes adquiridas durante el proceso de inyección. . . . .   | 86  |
| 5.2. Imágenes procesadas del proceso de inyección. . . . .  | 87  |
| 5.3. Orientación de los chorros. . . . .  | 88  |
| 5.4. Penetración del chorro a una presión de inyección de 1000 bar, una<br>presión ambiente de 60 bar y una duración de la inyección de 1500 $\mu$ s.                     | 89  |
| 5.5. Penetración del chorro a una presión de inyección de 1300 bar, una<br>presión ambiente de 60 bar y una duración de la inyección de 1500 $\mu$ s.                     | 90  |
| 5.6. Densidad combustibles. . . . .   | 91  |
| 5.7. Viscosidad cinemática combustibles. . . . .  | 92  |
| 5.8. Tensión superficial combustibles. . . . .  | 92  |
| 5.9. Penetración del chorro a dos presiones de inyección de 1000 y 1300<br>bar, una presión ambiente de 60 bar y una duración de la inyección<br>de 1500 $\mu$ s. . . . . | 93  |
| 5.10. Ángulo de apertura del chorro a una presión de inyección de 1000<br>bar, una presión ambiente de 60 bar y una duración de la inyección<br>de 1500 $\mu$ s. . . . .  | 94  |
| 5.11. Ángulo de apertura del chorro a una presión de inyección de 1300<br>bar, una presión ambiente de 60 bar y una duración de la inyección<br>de 1500 $\mu$ s. . . . .  | 95  |
| A.1. Cromatograma biodiésel de aceite usado de cocina. . . . .  | 102 |

# ÍNDICE DE TABLAS

---

|  |    |
|--|----|
| 2.1. Especificaciones técnicas seleccionadas en las normas de biodiésel ASTM D6751 y EN 14214. . . . . | 44 |
| 3.1. Componentes sistema de inyección . . . . .  | 56 |
| 3.2. Incertidumbres obtenidas en la simulación del proceso de inyección. . . . .                       | 61 |
| 4.1. Composición química del biodiésel de aceite usado de cocina por cromatografía de gases. . . . .   | 69 |
| 4.2. Especificaciones etanol anhidro. . . . .  | 69 |
| 4.3. Relación de mezclas ternarias elaboradas. . . . .   | 70 |
| 4.4. Gravedad específica de los combustibles. . . . .  | 78 |
| 4.5. Propiedades calculadas de los combustibles. . . . .   | 79 |
| 4.6. Especificaciones técnicas seleccionadas en las normas EN590 : 2014 y ASTM D975. . . . .           | 80 |
| 4.7. Mezclas elegidas para la experimentación. . . . .   | 81 |
| 4.8. Condiciones de operación habituales en un sistema de inyección diésel. . . . .                    | 81 |
| 4.9. Matriz de experimentos. . . . .   | 82 |

---

|   |     |
|---|-----|
| 4.10. Temperatura del combustible durante la experimentación. . . . . | 83  |
| 5.1. Orientación de los chorros. . . . .                              | 88  |
| B.1. Datos destilación D100. . . . .                                  | 104 |
| B.2. Datos destilación B100. . . . .                                  | 105 |
| B.3. Datos destilación E100. . . . .                                  | 106 |
| B.4. Datos destilación DB10E5. . . . .                                | 107 |
| B.5. Datos destilación DB20E5. . . . .                                | 108 |
| B.6. Datos destilación DB30E5 . . . . .                               | 109 |
| B.7. Datos destilación DB40E5. . . . .                                | 110 |
| B.8. Datos destilación DB10E10. . . . .                               | 111 |
| B.9. Datos destilación DB20E10. . . . .                               | 112 |
| B.10. Datos destilación DB30E10. . . . .                              | 113 |
| B.11. Datos destilación DB40E10. . . . .                              | 114 |
| B.12. Datos destilación DB10E20. . . . .                              | 115 |
| B.13. Datos destilación DB20E20. . . . .                              | 116 |
| B.14. Datos destilación DB30E20. . . . .                              | 117 |
| B.15. Datos destilación DB40E20. . . . .                              | 118 |

## CAPÍTULO 1

# INTRODUCCIÓN

---

*En este capítulo se presentan, en primer lugar, la motivación para la realización de este estudio. A continuación, se detallan los antecedentes del campo de conocimiento en que se enmarca la investigación. Por último, se expone la hipótesis junto con los objetivos, tanto de carácter general como específico, planteados para la realización de la investigación.*



## 1.1 MOTIVACIÓN

En las últimas dos décadas, el sector del automóvil ha tomado una gran importancia para los habitantes de los países industrializados, lo que ha producido un considerable incremento de la concienciación sobre los efectos de sus emisiones en el medio ambiente y en la salud de las personas [1]. En la actualidad, los automóviles son impulsados por motores que usan en su mayoría hidrocarburos como combustible. En la quema de éstos combustibles, dentro de los motores de combustión interna (MCI), se generan gases de escape que contienen principalmente dióxido de carbono ( $CO_2$ ), monóxido de carbono ( $CO$ ), óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ ), dióxido de azufre ( $SO_2$ ) y material particulado ( $PM$ ), también conocido como hollín. Entre los cuales, el  $CO_2$  es el que tiene las principales repercusiones negativas en el medio ambiente y el resto en la salud de las personas [2].

Por esta razón, desde hace años se pretende que el sector del automóvil mantenga las emisiones de gases de escape de los automóviles al nivel más bajo posible. Para ello, surge en 1992 en la Unión Europea un conjunto de requisitos que regulan los límites aceptables para las emisiones de gases de combustión interna de los automóviles, son los conocidos como normas EURO. Desde su implementación, estas normas han ido evolucionando y se han vuelto cada vez más restrictivas hasta el día de hoy que se encuentra instaurada la versión EURO VI. En la Figura 1.1 se puede observar como han ido evolucionando los límites de las emisiones para cada versión de la norma EURO [3].

Las modificaciones realizadas en los MCI no han logrado reducir lo suficiente las emisiones de contaminantes como para alcanzar los niveles máximos impuestos por la legislación [4]. Por otra parte, hay que tener en cuenta la limitación de las reservas de combustibles fósiles y su rápida disminución debido a la gran demanda de energía de la sociedad, esto está provocando un aumento de los precios y de los conflictos bélicos, por lo que algunos gobiernos se están preocupando considerablemente por

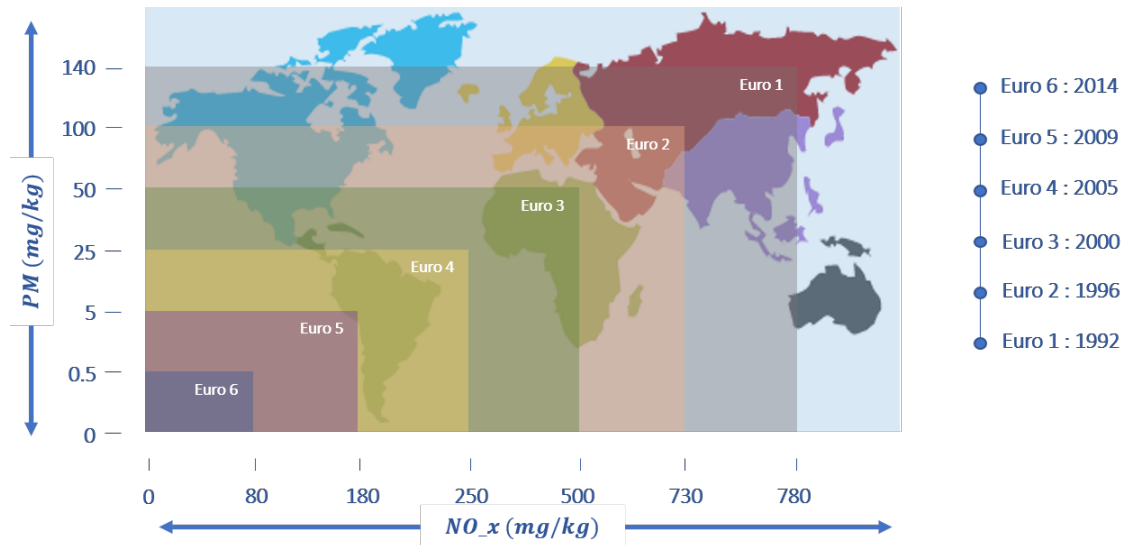


Figura 1.1: Evolución histórica de la norma EURO.

garantizar su seguridad energética [5].

El cambio climático, como resultado del calentamiento global causado por los gases de efecto invernadero, principalmente el  $CO_2$  que es producido durante la combustión de combustibles fósiles, han estado causando cambios significativos en los ecosistemas y produciendo cerca de 150,000 muertes adicionales cada año. El constante aumento de la temperatura media de la Tierra, amenaza a millones de personas con el creciente riesgo de hambre, inundaciones, escasez de agua y enfermedades [6].

Todo lo anterior, ha hecho que el uso de biocombustibles en los MCI haya tomado un gran impulso, tanto en forma pura, como en mezcla con combustibles fósiles. Los beneficios de los biocombustibles frente a los combustibles tradicionales incluyen una mayor seguridad energética, reducción del impacto ambiental, y las cuestiones socioeconómicas relacionadas con el sector rural. Además, la tecnología de los biocombustibles es relevante tanto para los países en desarrollo como para los industrializados. Estos podrían ser portadores energéticos pacíficos para todos los países, son renovables y disponibles en todo el mundo [7].

Los biocombustibles son una fuente de energía renovable que se produce a partir de materiales naturales, como la caña de azúcar, plantas oleaginosas (vegetales de

cuya semilla o fruto puede extraerse aceite), la biomasa forestal y otras fuentes de materia orgánica. Se pueden utilizar como sustitutos o en combinación con los combustibles derivados del petróleo. Como ejemplos, es posible mencionar biodiésel, etanol, metanol, metano y carbón vegetal [8].

Los motores de encendido por compresión (MEC) dominan el campo del transporte comercial y la maquinaria agrícola por su facilidad de uso y por su mayor eficiencia de combustible. A esto hay que añadir que el consumo de diésel es varias veces mayor que el de la gasolina, por lo que muchos de los esfuerzos están volcados en desarrollar combustibles alternativos, principalmente, para el remplazo total o parcial del diésel [9].

El biodiésel es una energía eficiente, limpia y 100 % natural alternativa a los combustibles derivados del petróleo, se puede obtener a partir de grasas de animales y de aceites vegetales nuevos o usados. Su uso es seguro en todos los motores diésel convencionales, ofrece el mismo rendimiento y durabilidad del motor que el diésel, es no inflamable y no tóxico, reduce las emisiones de escape, humos visibles y nocivos y olores. Además, se ha observado que los aceites vegetales y las grasas animales son combustibles prometedores debido a que sus propiedades son similares a las del diésel, tienen un poder calorífico, número de cetano, calor de vaporización y relación estequiométrica aire-combustible comparable con la del combustible diésel [10].

Por otra parte, el etanol es un combustible renovable obtenido a base de biomasa, producido por fermentación alcohólica de azúcares de materias vegetales como maíz, caña de azúcar, remolacha, sorgo, cebada y yuca [11]. Tiene una baja viscosidad en comparación con el diésel, por lo tanto, puede ser fácilmente inyectado, atomizado y mezclado con el aire. Además, produce menos emisiones debido al aumento de la relación estequiométrica combustible-aire, a su alto contenido de oxígeno, alta relación entre el hidrógeno y el carbono y bajo contenido en azufre [12].

El etanol también tiene muchas propiedades deseables tales como un buen octanaje y características de ebullición para el uso en motores de encendido provocado

(MEP). Por otra parte, la mezcla de etanol con combustible diésel reduce el número de cetano, la lubricidad, el punto de inflamación y la viscosidad del diésel, mientras que aumenta la volatilidad. Debido a estas características físicas y termodinámicas, el etanol no parece ser un combustible alternativo para MEC, pero la mezcla de etanol con diésel parece ser una forma más efectiva y factible [13].

## 1.2 ANTECEDENTES

Los aceites vegetales y las grasas animales fueron investigadas como combustibles diésel mucho antes de la crisis energética de los años 70, y a principios de los 80 se despertó un renovado interés por los combustibles alternativos. También se sabe que Rudolf Diesel (1858-1913), el inventor del motor que lleva su nombre, tenía cierto interés en estos combustibles. El primer registro del uso de aceites vegetales como combustibles líquidos en MCI fue el 10 de Agosto de 1893, cuando Diesel patentó un nuevo modelo de motor de combustión interna que funcionaba con aceite de cacahuete.

En 1912, Diesel expuso que *“El uso de aceites vegetales como combustibles puede parecer insignificante hoy. Pero con el tiempo pueden convertirse en combustibles tan importantes como el petróleo o el carbón lo son en nuestros días”*, más de un siglo después, los biocombustibles derivados de aceites vegetales o de grasas animales, conocidos como biodiésel, son considerados una alternativa prometedora para disminuir el impacto de las actividades humanas en el ambiente [14].

Por otra parte, el bioetanol lleva décadas utilizándose como combustible líquido, su interés como combustible ha ido creciendo desde la crisis del petróleo en la década de los 70. En 1876 Nicolaus Otto (1832-1891), el inventor del motor de combustión interna de cuatro tiempos, utilizó bioetanol para alimentar algunos de sus primeros motores y en 1894 Francia y Alemania utilizaron etanol en MCI [15]. Las primeras investigaciones sobre el uso de bioetanol en motores diésel se llevaron a

cabo en Sudáfrica en la década de los 70 y continuó en Alemania y EEUU durante la década de los 80 [16].

Hay que tener en cuenta algunos factores importantes cuando se toma en consideración la cuestión del uso de combustibles alternativos en los motores diésel. Éstos comprenden las características de combustión, rendimiento y emisiones [17]. Éstas, a su vez, dependen de factores como la presión de inyección, el inicio de la inyección, la cantidad de combustible inyectado, el número de inyecciones, el diseño de la cámara de combustión y los patrones de pulverización de la boquilla.

Una buena comprensión de las características de pulverización del combustible es esencial para aumentar la eficiencia de la combustión y reducir las emisiones [18], para ello se necesita una correcta predicción del comportamiento de los combustibles en el proceso de mezcla. Existen cuatro parámetros claves que influyen en el proceso de mezcla, las características del flujo de aire en el cilindro, la penetración y el ángulo de apertura del chorro, y finalmente las propiedades del combustible. Tanto la penetración y el ángulo de apertura del chorro están en función de las propiedades del combustible [19].

Durante los años ochenta, se investigaron las mezclas de etanol con diésel en MEC. Se llegó a la conclusión de que estas mezclas, también conocidas como diesohol, son técnicamente utilizables en los motores diésel sin necesidad de hacer grandes modificaciones [20]. La principal ventaja de su uso es su alto contenido de oxígeno, que es de alrededor del 34 % en peso [21].

Hay una serie de propiedades de los combustibles que son esenciales para el correcto funcionamiento del motor diésel. La adición de etanol al combustible diésel afecta a ciertas propiedades claves con particular referencia a la estabilidad de la mezcla, la viscosidad, la densidad, la tensión superficial y el número de cetano [17].

El número de cetano de estas mezclas se reduce en comparación al del combustible diésel, la adición del 10  $v/v$  % de etanol lo disminuye aproximadamente en un 30 %. La densidad y la viscosidad también se ven reducidas [20]. La viscosidad

disminuye aproximadamente entre el 10% y el 25% en la adición de 10  $v/v\%$  de bioetanol [22]. El mayor problema de estas mezclas es que su estabilidad es muy pobre. Depende de la composición química del combustible diésel utilizado, de la temperatura a la que se utilice y del porcentaje de etanol presente en la mezcla [23].

Para resolver estos problemas y aumentar la proporción de etanol en la mezcla, se puede utilizar un emulsionante para mantener las propiedades de la mezcla próximas a las del combustible diésel [24]. El biodiésel puede ser utilizado como emulsionante, permite estabilizar la mezcla a largo plazo y a bajas temperaturas [25, 26, 27].

El uso de biodiésel como emulsionante, en lugar de utilizar cualquier otro aditivo artificial, conlleva a un aumento del porcentaje de biocombustible en la mezcla y por ende, disminuya el de diésel. Por otro lado, aumenta la viscosidad, la densidad, la tensión superficial y el número de cetano de la mezcla diésel-etanol, debido a que la viscosidad, la densidad, la tensión superficial y el número de cetano del biodiésel es mayor, situando a estas propiedades dentro de los límites prescritos para el combustible diésel [22, 28].

De acuerdo con Barabás y Todorut [29], las mezclas de diésel-biodiésel-etanol son una gran opción como combustible alternativo al diésel para los motores de encendido por compresión. Las propiedades de esta mezcla ternarias son muy similares al combustible diésel, y además, se encuentran estables incluso por debajo de los 0 °C [26]. Por lo tanto, la adición de biodiésel en la mezcla de diésel-etanol muestran resultados favorables para la formulación de una nueva mezcla de biocombustible y combustible diésel [21].

En los últimos años, una gran cantidad de investigaciones se han llevado a cabo para utilizar mezclas de diésel-biodiésel-etanol en motores de encendido por compresión. Diversos aspectos han sido estudiados, principalmente, en relación a las emisiones de gases de escape, pero también en relación al rendimiento del motor (consumo de combustible y potencia) [21, 30, 31, 32, 33, 34], sin embargo, pocos

han sido los estudios realizados sobre las características de pulverización de estas mezclas.

Park et al. [35], estudiaron la estabilidad, las propiedades y las características de pulverización de las mezclas de diésel-etanol en varios porcentajes de etanol (10 %, 20 % y 30 %). Los resultado de estabilidad concluyeron que la adición del 5% de biodiésel como aditivo a la mezcla de diésel-etanol evitó la separación de fases entre el diésel y el etanol. Además, aumento el bajo número de cetano de la mezcla, debido al elevado número de cetano del biodiésel. También se observó que a medida que aumentaba el porcentaje de etanol en la mezcla, las propiedades de densidad, viscosidad y tensión superficial disminuían (1.2).

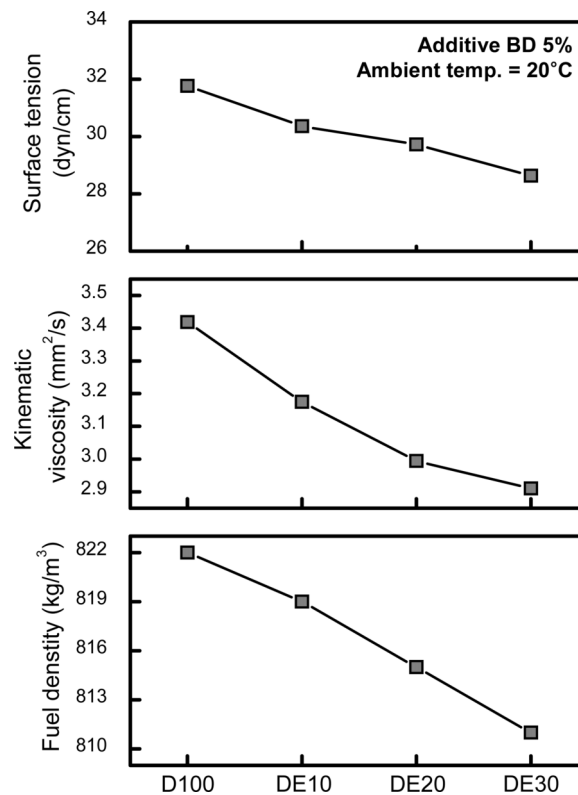


Figura 1.2: Propiedades de mezclas de diésel-etanol.

Por otro lado, las mezclas fueron inyectadas, a una presión de 600 y 1200 *bar*, mediante un sistema de inyección common rail dentro de una cámara a volumen constante presurizada a 20 y 30 *bar* con nitrógeno. Observaron que las mezclas

con baja tensión superficial y densidad se mezclaron bien con el aire circundante, debido a la evaporación de las gotas de etanol. Por otro lado, la adición de etanol al combustible diésel afectó ligeramente a la penetración (Figura 1.3) y al ángulo de apertura (Figura 1.4) del chorro, mientras que el tamaño medio de las gotas de combustible disminuyó con el aumento en la relación de etanol en la mezcla. A partir de estos resultados, se dedujo que la atomización del combustible diésel puede mejorar mediante la adición de etanol.

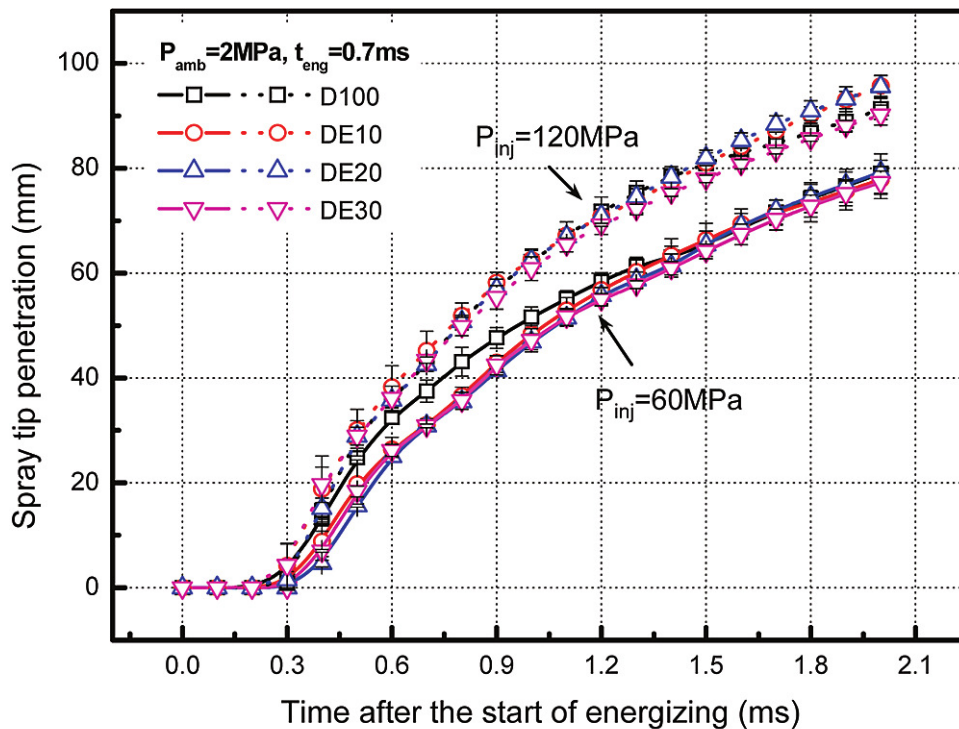


Figura 1.3: Penetración del chorro de mezclas de diésel-etanol.

Los estudios relacionados con las propiedades de densidad, viscosidad, tensión superficial y número de cetano de estas mezclas ternarias son más numerosos. La densidad es una propiedad muy importante del combustible que afecta directamente a las características de rendimiento y combustión del motor, y a la eficiencia de la atomización del combustible [36]. Barabás et al. [37] probaron la densidad de varias mezclas de diésel-biodiésel-etanol y encontraron que la densidad de estas mezclas ternarias están muy próximas a la densidad del combustible diésel en el dominio de



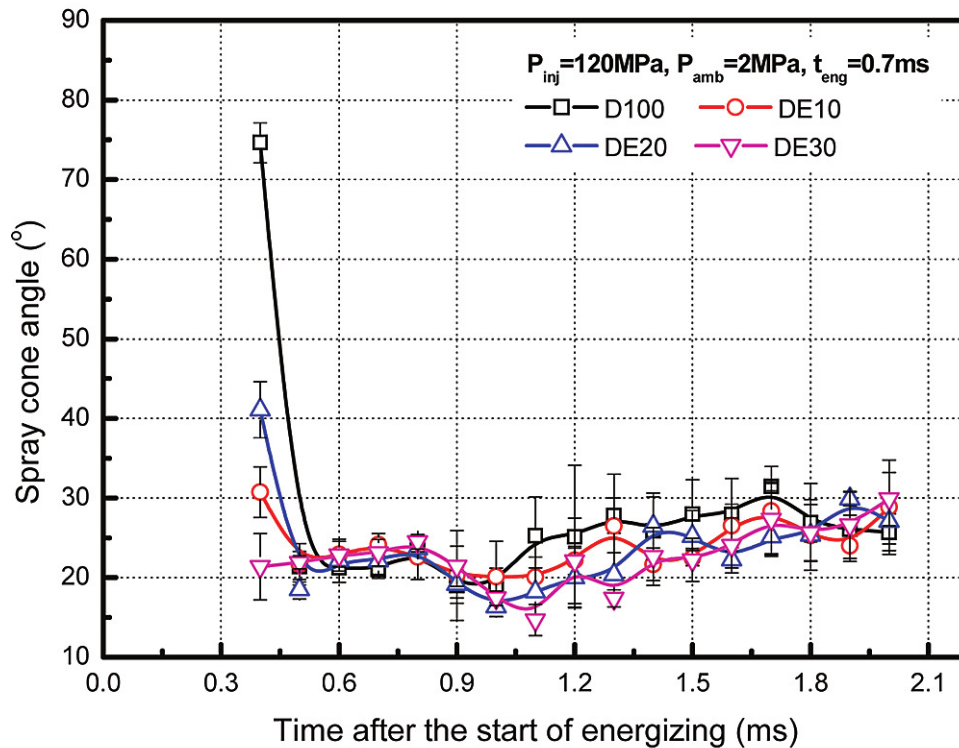


Figura 1.4: Ángulo de apertura del chorro de mezclas de diésel-etanol.

temperaturas de 0 a 80 °C.

Kwanchareon et al. [31] prepararon algunas mezclas ternarias con diferentes proporciones de diésel, biodiésel y etanol para pruebas de propiedades de combustible. También determinaron que la densidad de las mezclas disminuye a medida que el porcentaje de etanol aumenta en las mezclas lo cual se atribuye al hecho de que el etanol tiene una baja densidad que disminuye la densidad final de la mezcla. Cuando el porcentaje de biodiésel aumenta en las mezclas, la densidad final de las mezclas aumenta debido a la densidad del biodiésel, que es mayor que los dos componentes anteriores. Los valores de densidad de todas las mezclas fueron satisfactorios y se encontraron dentro de los límites aceptables para los motores diésel.

Por otro lado, la viscosidad también es una propiedad muy importante del combustible. Afecta el tamaño de las gotas de combustible, la penetración del chorro, la calidad de la atomización y de la combustión, y las características de pulverización

del chorro [36]. A la viscosidad le ocurre lo mismo que a la densidad, Park et al. [38] encontraron que la viscosidad aumentaba con el aumento del porcentaje de biodiésel y disminuía con el aumento del porcentaje de etanol.

En cuanto a la formación de gotas y a la combustión, un parámetro importante que hay que tener en cuenta es la tensión superficial del combustible. Es difícil formar gotas de combustible líquido con una tensión superficial muy elevada [39]. La tensión superficial de la mezcla diésel-biodiésel-etanol aumenta linealmente con el aumento del contenido de biodiésel [40], y disminuye con el aumento del contenido de etanol [29].

Por último, el número de cetano determina la facilidad de inflamación de los combustibles utilizados en los motores diésel [37]. El número de cetano es una de las propiedades que determina la calidad global del combustible, el valor mínimo de éste está determinado por el diseño del motor, el tamaño, la naturaleza de la velocidad y las variaciones de carga, así como las condiciones de arranque y atmosféricas. El uso de combustibles con un número de cetano superior al requerido no aumenta materialmente el rendimiento del motor, y que éste sea menor podría causar un funcionamiento áspero del motor. Además, combustibles con un bajo número de cetano son causantes de que haya un mayor número de depósitos en el motor, lo que resulta en un aumento en los humos, en las emisiones de escape y en un mayor desgaste del motor [41].

Barabás et al. [37] determinó que el número de cetano de las mezclas de diésel-biodiésel-etanol disminuye debido al bajo número de cetano del etanol. Sin embargo, el biodiésel puede recuperar esta propiedad debido a su alto número de cetano, por lo que la mezcla puede alcanzar los límites de número de cetano requeridos para ser utilizada en motores diésel [42].

En 2015, Shahir et al. [43] realizaron una revisión sobre la viabilidad de las mezclas diésel-biodiésel-etanol como combustible para MEC, en la que se evaluó las propiedades, la estabilidad, la seguridad y la combustión de la mezcla. Los autores

determinaron que el uso de estas mezclas disminuyen el uso de combustible diésel entre un 25 % y un 30 %. Además, la adición de biodiésel a estas mezclas ayuda a recuperar las propiedades del combustible a los valores estándar y, por lo tanto, estas pueden ser utilizadas eficientemente en los motores diésel.

Los estudios sobre los parámetros macroscópicos de los chorros de inyección de mezclas de diésel-biodiésel-etanol son escasos, y se necesita más información para comprender el comportamiento de los motores de encendido por compresión alimentados con combinaciones de estos combustibles. Ya que para tener una combustión completa, unas menos emisiones contaminantes y un rendimiento óptimo del motor, es esencial que el chorro inyectado englobe la mayor cantidad de aire posible para conseguir un mezclado adecuado de aire-combustible y éste depende en gran medida de la penetración y del ángulo de apertura del chorro [44]. Por todo esto, resulta de interés el estudio de los parámetros macroscópico de los chorros de inyección de mezclas de diésel-biodiésel-etanol.

### 1.3 HIPÓTESIS

Con base a todo lo anterior, se plantea la siguiente hipótesis para esta investigación:

**Las mezclas de diésel-biodiésel-etanol representan oportunidades factibles de aplicación en MEC, y esto requiere del estudio detallado de los parámetros macroscópicos de los chorros de inyección, donde la penetración y el ángulo de apertura de éste tiene un papel muy importante en el proceso de mezcla, y éste puede ser determinado mediante la técnica óptica de iluminación directa por dispersión MIE.**

## 1.4 OBJETIVOS

### 1.4.1 OBJETIVO GENERAL

El objetivo general del presente estudio es **determinar la influencia de la densidad, viscosidad y tensión superficial de las mezclas ternarias de combustibles en la penetración y en el ángulo de apertura del chorro de inyección, por medio de la toma y análisis de imágenes del proceso de inyección mediante la técnica óptica de iluminación directa por dispersión MIE y un software de procesamiento de imágenes.**

### 1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para la obtención del objetivo general se plantean los siguientes objetivos de carácter específico:

- **Definir las proporciones de los componentes de las mezclas ternarias.** Se definirá el porcentaje de cada uno de los componentes que conformarán las mezclas ternarias con base a la literatura.
- **Elaborar y estudiar la estabilidad de las mezclas antes definidas.** Esta actividad constará en la elaboración de las mezclas y en la observación de que éstas no sufran una separación de fases durante un período y a una temperatura de 22 °C.
- **Caracterizar las mezclas antes definidas.** Esta actividad constará en la obtención de la curva de destilación y de la gravedad específica de cada mezcla, para después utilizar estos datos en la obtención del índice de cetano, la densidad, la viscosidad y la tensión superficial de cada una de ellas.

- **Delimitar el número de mezclas para evaluar experimentalmente.**  
Con base al estudio de estabilidad y a la comparación de las propiedades calculadas anteriormente con las normas vigentes de combustibles para automoción, se definirán cuales son las mezclas más adecuadas para ser evaluadas experimentalmente.
- **Evaluar experimentalmente los parámetros macroscópicos del chorro inyectado de las mezclas seleccionadas.** Para ello se hace uso de la instalación experimental situada en el Laboratorio de Fenómenos de Transporte del Laboratorio de Investigación e Innovación en Tecnología Energética (*LIITE*) de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (*FIME*), en la Universidad Autónoma de Nuevo León (*UANL*). Ésta está conformada por una maqueta de visualización a volumen constante, que cuenta con todos los sistemas auxiliares que permiten la realización de los ensayos, así como de una cámara de alta velocidad. En la experimentación se controlarán las variables de presión ambiente, presión de inyección, duración de la inyección y número de inyecciones. Posterior a la experimentación se realizará el procesamiento de las imágenes.
- **Generar recomendaciones sobre la factibilidad del uso de mezclas ternarias en MEC, de acuerdo a la calidad del proceso de mezcla.** Una vez obtenidos los datos de penetración y ángulo de apertura de los experimentos llevados a cabo, se procederá a determinar la viabilidad del uso de mezclas ternarias en MEC.

## CAPÍTULO 2

# MARCO TEÓRICO

---

*En este capítulo se realiza una revisión de los conceptos teóricos involucrados en el presente estudio. Se comienza explicando el proceso de inyección en motores de encendido por compresión. Después, se exponen los conceptos básicos acerca del bioetanol y el biodiésel como biocombustible. Y por último, se detallan algunas correlaciones que permiten el cálculo de la densidad, la viscosidad, la tensión superficial y el índice de cetano de las mezclas.*

## 2.1 EL PROCESO DE INYECCIÓN EN MEC

### 2.1.1 SISTEMA DE INYECCIÓN DIÉSEL

El sistema de inyección es el responsable de la entrega de combustible al motor Diesel para su funcionamiento. Para ello, tiene que cumplir las siguientes funciones básicas:

- Introducir el combustible en el interior de la cámara de combustión según la tasa de inyección o ley de entrega, la cual define el comportamiento de las diferentes fases de la combustión en sincronismo con el movimiento del pistón.
- Atomizar el combustible para aumentar la superficie en contacto con el aire caliente, tras la etapa de compresión, y acelerar la evaporación.
- Mezclar el combustible con el aire disponible en la cámara de combustión.

Según el rango de presión de trabajo, se distinguen dos partes fundamentales en un sistema de inyección:

- *Circuito de baja presión:* trabaja con presiones desde la atmosférica hasta la del orden de 0.3 MPa, está compuesto por el *depósito*, los *filtros de combustible* (destinados a retener las sustancias sólidas contenidas en el combustible que podrían dañar los diferentes elementos mecánicos), la *bomba de alimentación* (que asegura una presión a la entrada de la bomba de alta presión entre 0.2 y 0.3 MPa), el *regulador de presión* (que limita la presión de salida de la bomba de alimentación) y las *líneas de baja presión*.
- *Circuito de alta presión:* trabaja con presiones desde 10 hasta 200 MPa, donde se genera la presión requerida para la inyección del combustible. Dicha generación depende del tipo de sistema de inyección del que se trate.

De acuerdo al modo en que se produce la inyección de combustible, los sistemas de inyección pueden ser de *inyección indirecta* (*Indirect Injection*, IDI) o de *inyección directa* (*Direct Injection*, DI). En ambos casos el objetivo que pretende el diseño de la cámara de combustión y el sistema de inyección es favorecer la mezcla aire-combustible, el protagonismo del sistema de inyección es muy diferente en ambas variantes:

- En los sistemas IDI es el aire quien asume la responsabilidad de generar los campos difusivos y convectivos necesarios para el proceso de mezcla, siendo secundaria la función del combustible. Para ello se encierra el aire en una precámara ubicada en la culata, adicional a la cámara de combustión, imprimiéndole un enérgico movimiento de torbellino. Se inyecta el combustible con movimiento intenso en el seno de ese aire y sin dificultad se consigue una buena mezcla. En este sistema la presión de inyección no tiene mucha influencia, por lo que no se necesitan sistemas de inyección muy sofisticados.
- En los sistemas DI, en cambio, es el combustible el que se encarga de la realización de la mezcla. Para ello, debe ser inyectado dentro de la cámara de combustión a elevada presión, finamente atomizado y bien repartido a fin de asegurar una correcta mezcla con el agente oxidante. Como apoyo al sistema de inyección, es habitual imprimir al aire un movimiento de rotación alrededor del eje del cilindro (*swirl*) ocasionado por el diseño del colector de admisión, favoreciendo así la dispersión del diésel en la cámara de combustión. Además, se necesita de una buena calidad del chorro, por lo que los inyectores son más complejos que los de inyección indirecta. Están equipados con toberas de varios orificios, con diámetros entre  $100\ \mu m$  y  $250\ \mu m$ . También son más robustos ya que tienen que trabajar a grandes presiones. Estos sistemas poseen un mayor rendimiento que los IDI, consecuencia de sus menores pérdidas de calor debido a la menor relación superficie/volumen, este hecho, ha llevado a que los sistemas DI desplacen del mercado a los sistemas IDI, estando estos últimos en desuso [45].



En la Figura 2.1 [46] se puede ver un sistema de inyección directa y un sistema de inyección indirecta.

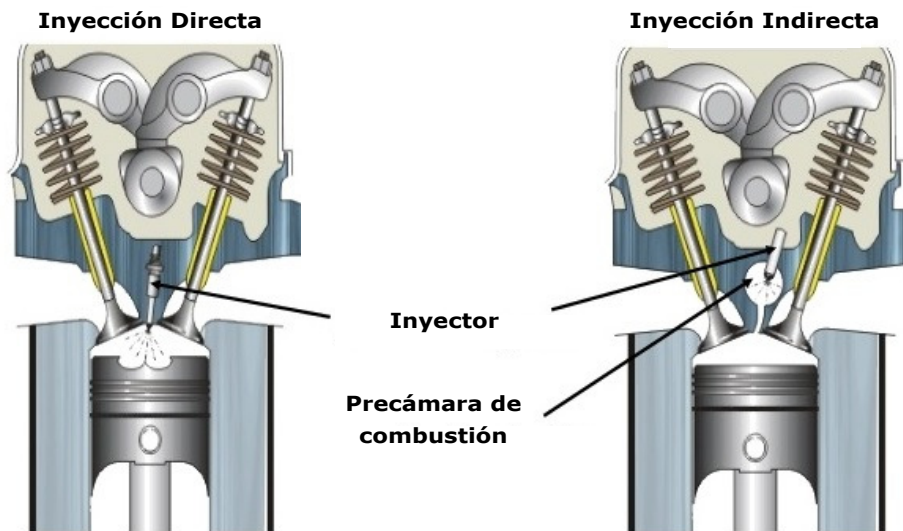


Figura 2.1: Sistema de inyección directa e indirecta.

El menor consumo y el mayor rendimiento de la inyección directa han favorecido el constante aumento en la investigación con estos sistemas de inyección, y la extensión del campo de aplicación de los mismos a los motores rápidos.

Las consecuencias sobre el sistema de inyección son [45]:

- Constante *elevación de la presión de inyección*. Algunos sistemas de inyección ya alcanzan los 200 MPa.
- *Aumento del número de orificios* de la tobera del inyector, además de la *disminución del diámetro* de los mismos, con el propósito de producir una atomización más homogénea del chorro.
- *Empleo de inyección múltiple*. Así, como, la utilización de inyección piloto, la cual consiste en la preinyección de combustible antes de que se realice la inyección principal. Esta inyección consigue aumentar la temperatura de la cámara de combustión y reduce el tiempo que tarda el combustible de la inyección

principal en inflamarse. Se logra un funcionamiento más suave del motor y una reducción de las emisiones de  $NO_x$ .

#### 2.1.1.1 TIPOS DE SISTEMAS DE INYECCIÓN DIRECTA

Fundamentalmente se distinguen dos grupos importantes, los *sistemas de acción directa* y los *sistemas de acumulación* [47].

En los *sistemas de acción directa*, la bomba de alta presión dosifica el combustible que se requiere inyectar en la cámara de combustión, mientras que la misión del inyector es atomizarlo. En este caso la presión de inyección alcanzada depende del régimen de giro de la bomba, que no es constante a lo largo de la inyección. El inicio de la inyección es determinado por la propia presión del combustible que debe vencer la acción de un muelle situado en el inyector. Este tipo de sistemas fueron los primeros en utilizarse en motores de inyección directa, pero su utilización ha sido desplazada en los últimos años por los sistemas *common rail* e *inyector-bomba* que se describen más adelante.

En los *sistema de acumulación*, la bomba de alta presión aumenta la presión del combustible, manteniéndola constante e igual al valor consigna, mientras que el inyector dosifica y atomiza el combustible. La apertura del inyector puede estar gobernada mecánicamente o electrónicamente. En estos sistemas, la entrega de combustible disminuye con el aumento del régimen de giro. Esto lleva a que estos sistemas se empleen, fundamentalmente, en motores destinados a trabajar a régimen de giro constante (motores estacionarios).

El aumento de la fiabilidad y la reducción de los costes de los sistemas en los que la apertura del inyector se gobierna electrónicamente, ha permitido el desarrollo del sistema de acumulación electrónico *common rail* (raíl común). Estos sistemas de inyección permiten una mayor flexibilidad y precisión, permitiendo que la cantidad de combustible a inyectar tenga la distribución deseada. De esta manera se introdu-

cen varios grados de libertad para la reducción de los contaminantes y el consumo, permitiendo por ejemplo la realización de inyecciones piloto o postinyecciones, la elección de los puntos de inyección, las duraciones de las diferentes fases de la inyección y el control de la presión de inyección. La utilización de estos sistemas, ha experimentado un gran crecimiento desde 1998, siendo en la actualidad el sistema que más se utiliza en motores Diesel.

Adicionalmente a los dos grupos nombrados anteriormente, existe un tercer tipo llamado *sistema inyector-bomba*. En este sistema, la bomba, el inyector y la válvula electromagnética constituyen una unidad compacta ubicada en la culata del motor, que es accionada mecánicamente por el árbol de levas del motor y electrónicamente por la unidad de control del motor o ECU (sigla en inglés de *engine control unit*). Este sistema, al igual que el *common rail*, reúne la flexibilidad de cualquier sistema gestionado electrónicamente, pero presenta un principio de funcionamiento bastante diferente. La diferencia fundamental se encuentra en que la presión de inyección se genera en el mismo inyector a través del bombeo de un émbolo accionado por una leva. Gracias a esa generación, la principal ventaja frente al sistema *common rail* son las mayores presiones máximas; no obstante, la desventaja más destacada es la dependencia de esa presión con el régimen de giro, y sobre todo la mayor complejidad de la culata del motor.

#### 2.1.1.2 EL SISTEMA COMMON RAIL

Como se ha expuesto con anterioridad, este sistema forma parte de los sistemas de acumulación. En la Figura 2.2 [48] se muestra un esquema de un sistema *common rail*.

Una bomba de baja presión aspira el combustible del depósito y alimenta la bomba de alta presión. Esta bomba está accionada por el cigüeñal del motor y suministra combustible, a través de un depósito común (*common rail*), hacia los

inyectores localizados en los diferentes cilindros del motor. Gran parte de este combustible es inyectado en la cámara de combustión y la parte restante se utiliza para el pilotaje hidráulico de los inyectores. Esta cantidad de combustible vuelve al depósito conformando el caudal de control o de retorno de los inyectores. El volumen de combustible englobado entre la bomba de alta presión y los inyectores sirve como acumulador (raíl común). Además de su función como depósito acumulador, el raíl hace la función de amortiguador de las oscilaciones de presión provocadas por el vaivén de los pistones de la bomba de alta presión, así como de las perturbaciones generadas por la brusca salida del combustible a través de los orificios de descarga de los inyectores.

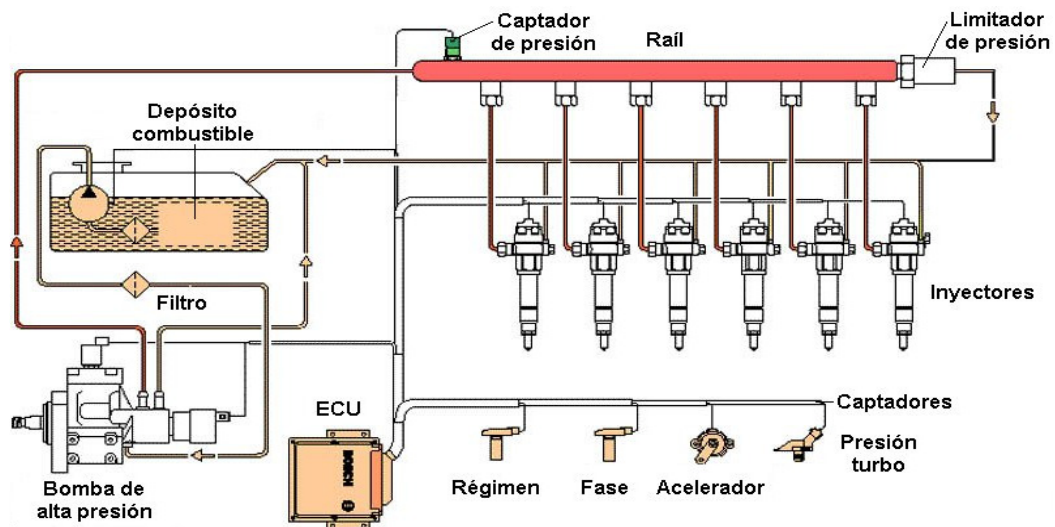


Figura 2.2: Diagrama del sistema de inyección common rail.

Un orificio de descarga situado en el limitador de presión, en uno de los extremos del raíl, se abre o se cierra para igualar la presión del combustible, medida con un sensor colocado en el raíl, con el valor de consigna almacenado en la ECU. El caudal sobrante de combustible retorna al depósito.

Los inyectores se abren y se cierran controlados por la ECU en instantes definidos. La cantidad de combustible inyectado está determinada por la duración de inyección, la presión de combustible en el raíl y la capacidad de descarga de los orificios de la tobera. Estos orificios son la parte más compleja e importante de este

tipo de sistemas. Según del sistema de accionamiento interno del inyector se habla de inyectores accionados por válvula de *tipo solenoide o electromagnética* o de *tipo piezoeléctrico*, estos últimos permiten una respuesta más rápida del inyector en comparación a los primeros [48].

En la Figura 2.3 [47], se observa un esquema de un inyector *common rail* de tipo solenoide.

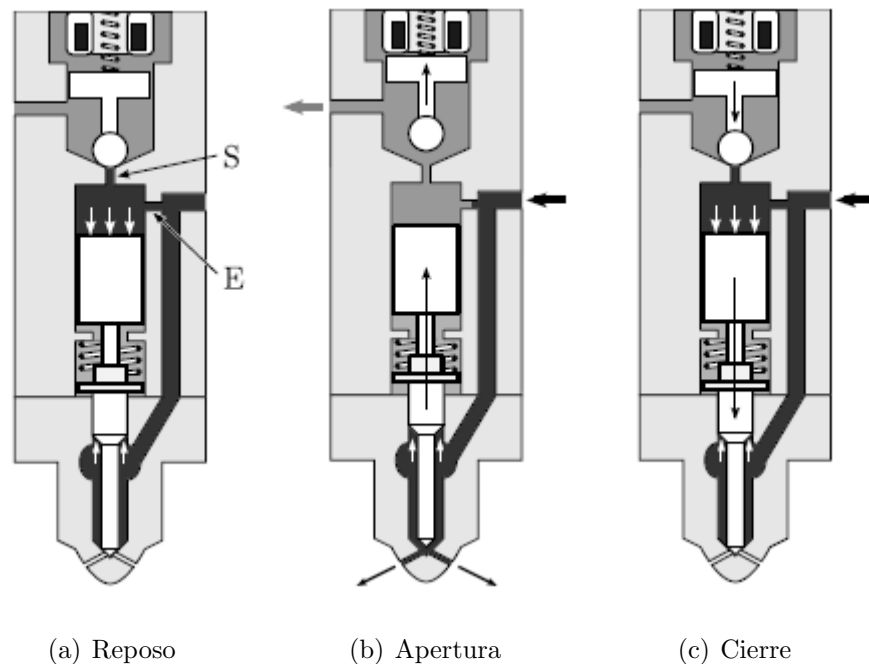


Figura 2.3: Funcionamiento de un inyector common rail.

El combustible procedente del raíl a alta presión entra al inyector donde se divide en dos conductos. Un conducto se dirige hacia la parte baja del inyector, que es el que alimenta a la tobera, y el otro alimenta al volumen de control, en la parte superior de la varilla, a través del orificio de entrada E.

Cuando el solenoide está desactivado, el orificio de salida S se encuentra en su posición de reposo (Figura 2.3a). Tanto en la parte superior de la varilla, a través del orificio E, como en la parte inferior de la aguja de la tobera, el combustible se encuentra a la presión del common rail y debido a que la sección de la parte superior de la varilla es mayor que la sección de la parte inferior de la aguja, y

la acción de la fuerza de pretensión del muelle, evitan la inyección. Una vez que el solenoide se activa, se abre el orificio S y como resultado, disminuye la presión en el volumen de control (Figura 2.3b). Por lo que la presión en la parte superior de la varilla es menor que la de la parte inferior de la aguja, produciéndose así el levantamiento del conjunto varilla-aguja, y destapándose los orificios de descarga de la tobera, generando la inyección. Al desactivar la válvula del solenoide (Figura 2.3c), el orificio de salida S se cierra, y la presión realizada sobre la parte superior se recupera, provocando el descenso del conjunto varilla-aguja, originando el cierre de los orificios de descarga de la tobera, y por lo tanto, el final de la inyección.

Con la intención de reducir el tiempo de respuesta del inyector se utilizan también en la actualidad los inyectores de tipo piezoeléctrico. El funcionamiento y estructura interna es igual que el descrito con anterioridad, pero con la diferencia de que la bobina de excitación se encuentra sustituida por un accionamiento piezoeléctrico, al cual se le aplica una tensión y permite la apertura del orificio de salida del volumen de control [45].

### 2.1.2 TASA DE INYECCIÓN

La *tasa de inyección* o *ley de entrega de combustible* es una de las características que define al sistema de inyección y es un parámetro importante en un motor Diésel puesto que define la secuencia de entrega de combustible al motor. Se define como el gasto másico instantáneo de combustible a la salida del orificio del inyector.

El *gasto másico* o *flujo másico* se define como la variación de la masa en el tiempo. Normalmente se supone flujo unidimensional, es decir, con una densidad y área constante e independiente de la posición, por lo que su cálculo se puede determinar con la siguiente ecuación:

$$\dot{m}_f = A_{ef} \cdot \rho_f \cdot u_{ef} \quad (2.1)$$

donde  $A_{ef}$  es el área efectiva de la tobera,  $\rho_f$  es la densidad del combustible y  $u_{ef}$  es la velocidad efectiva uniforme a lo largo del área de inyección del combustible. Esta velocidad puede ser determinada mediante la técnica de medida óptica LDA (*Laser Doppler Anemometry*) [49].

### 2.1.2.1 VELOCIDAD Y ÁREA EFECTIVAS

La velocidad efectiva y el área efectiva a la salida del orificio son dos parámetros muy útiles en el estudio de la inyección [50, 51]. En la Figura 2.4 se representa el flujo a la salida de la tobera, en ella se muestra la situación genérica (a), que en el caso más complejo considera la presencia de burbujas provenientes de la cavitación originada en la entrada al orificio, y la situación equivalente simplificada (b) [52].

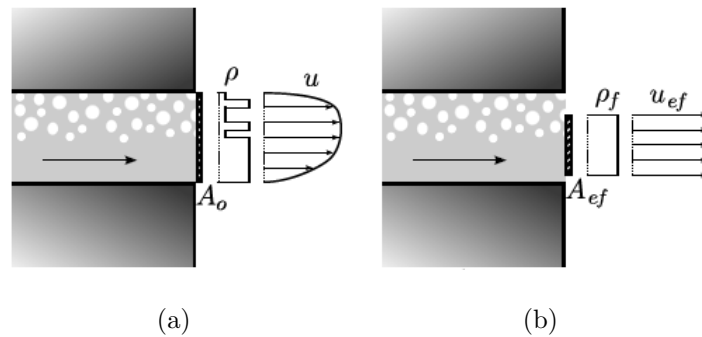


Figura 2.4: Definición de velocidad y área efectiva.

El flujo real a la salida de un orificio de inyección viene determinado por el perfil de velocidad y de densidad del fluido (Figura 2.4a). A pesar de que las propiedades de estos perfiles son completamente desconocidas es posible definir una velocidad y un área efectivas de forma que resulten representativas del flujo. La definición de estos parámetros está basada en considerar un flujo simplificado, el cual está caracterizado por un área efectiva ( $A_{ef}$ ), menor a la geométrica, a través de la cual sale el flujo con una velocidad efectiva ( $u_{ef}$ ), y con densidad igual a la del líquido ( $\rho_f$ ), uniformes en toda la sección, Figura 2.4b.

Las pérdidas de área efectiva con respecto al área geométrica están relacionadas a las siguientes posibles causas:

- Perfil de velocidad no uniforme.
- Cavitación en la salida del orificio.
- Fenómeno de separación completa del flujo.

### 2.1.3 EL CHORRO DE INYECCIÓN

#### 2.1.3.1 PROCESO DE ATOMIZACIÓN

Para que se lleve a cabo el proceso de combustión, el combustible que se introduce en la cámara de combustión a través de la tobera de inyección debe mezclarse con el aire presente en la cámara y evaporarse. Para efectuar lo anterior, el primer paso consiste en pasar de una columna líquida a un chorro integrado por gotas lo más pequeñas posibles, con el fin de que el proceso de evaporación sea más eficiente. Al proceso de descomposición del chorro en gotas se le conoce como atomización.

Desde que sale de la tobera, el combustible en fase líquida se encuentra bajo la acción conjunta de fuerzas que tratan de mantenerlo cohesionado, y fuerzas disruptivas, cuya influencia trata de producir perturbaciones en su estructura. Si estas perturbaciones superan en intensidad a las fuerzas cohesivas, esto produciría oscilaciones en la superficie del chorro que crecerían hasta ocasionar la ruptura del mismo. A este proceso se le denomina *atomización primaria*. Posteriormente, si las gotas son lo suficientemente grandes, el balance entre fuerzas cohesivas y disruptivas seguirá estando desequilibrado. Por lo que, se generará una segunda ruptura de estas gotas, hasta lograr un tamaño suficiente como para lograr el equilibrio. A este otro proceso se le denomina *atomización secundaria*.



En las siguientes secciones se describirán las diferentes maneras en que se puede llevar a cabo el proceso de atomización primaria, así como los diferentes mecanismos que lo provocan [53].

### 2.1.3.2 REGÍMENES DE ATOMIZACIÓN

Como exponen Lefèbvre [54] y Reitz y Bracco [55], existen cuatro regímenes de atomización en función de la velocidad del chorro.

#### **Régimen de Rayleigh.**

Este régimen se da para velocidades bajas de inyección, del orden de 10 m/s, donde la tensión superficial produce la atomización de la vena líquida. Se producen deformaciones radiales axisimétricas debido a las interacciones entre las fuerzas de tensión superficial y las perturbaciones iniciales en la superficie del chorro. Son estas perturbaciones, debido a su aumento, las que provocan la ruptura de la vena líquida en gotas de diámetro uniforme.

#### **Primer régimen inducido por interacción aerodinámica.**

Para velocidades más elevadas de inyección, se intensifica el producto de las fuerzas aerodinámicas en consecuencia a la velocidad relativa entre la vena líquida y el gas ambiente. Se presentan dos modos diferentes debido a la velocidad del chorro:

- *Para velocidades más bajas* la interacción aerodinámica aumenta las fluctuaciones axisimétricas ocasionadas por las fuerzas de tensión superficial, lo que conlleva a una atomización más rápida, con gotas cuyo diámetro es del mismo orden de magnitud que el de la vena líquida.
- *Para velocidades más altas*, las fuerzas aerodinámicas toman mayor importancia. El chorro oscila alrededor de su eje de simetría inicial, adquiriendo una forma helicoidal alargada y la sección de la vena líquida disminuye.

### Segundo régimen inducido por interacción aerodinámica.

La fuerza aerodinámicas comienzan a ser predominantes, debido al aumento de la velocidad de inyección. La superficie de la vena líquida empieza a llenarse de pequeñas oscilaciones, producidas tanto por la turbulencia que se genera a la salida del inyector, como por la interacción aerodinámica. La velocidad de inyección influye en la distancia que se produce entre el orificio de salida y el comienzo de la separación de gotas. Estas gotas tienen un diámetro del orden de la longitud de onda de las perturbaciones.

### Régimen de atomización.

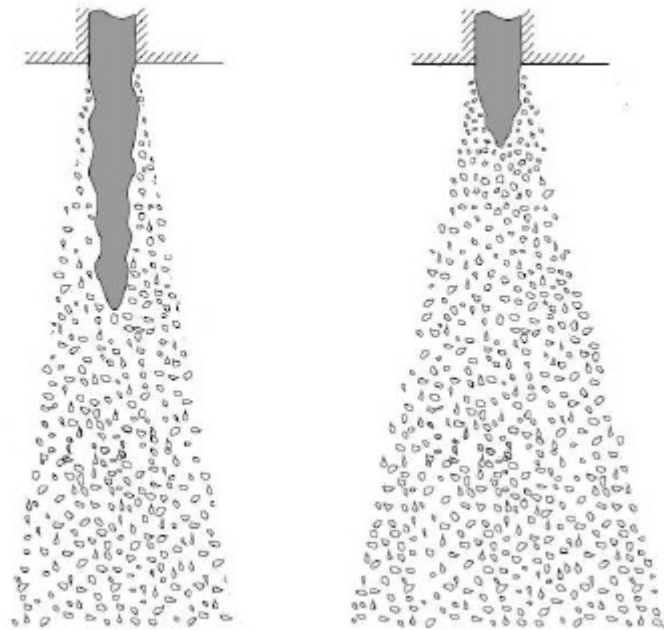
En este régimen la atomización empieza muy cerca de la salida del orificio o incluso en la misma, como consecuencia del aumento de la velocidad de inyección. A estas velocidades tan elevadas empiezan a aparecer otros mecanismos como turbulencia, cavitación, entre otras. En la Figura 2.5 se muestra el aspecto que tendría el chorro en este régimen y se distingue un régimen de atomización incompleta (Figura 2.5a) y otro de atomización completa (Figura 2.5b). La diferencia entre ambos es la mayor longitud de ruptura y el menor ángulo del chorro en el caso de la atomización incompleta frente a la atomización completa.

#### 2.1.3.3 ANÁLISIS DIMENSIONAL DEL PROCESO DE ATOMIZACIÓN

##### PRIMARIA

La desintegración de la vena líquida puede ser cuantificada por medio de números adimensionales que relacionan los distintos parámetros que intervienen en el fenómeno, estos son:

- Densidad del gas:  $\rho_g$
- Velocidad de inyección relativa líquido-aire:  $u_{ef}$
- Diámetro efectivo de la tobera:  $\phi_{ef}$



(a) A. incompleta

(b) A. completa

Figura 2.5: Régimen de atomización.

- Densidad del combustible:  $\rho_f$
- Viscosidad dinámica del combustible:  $\mu_f$
- Viscosidad cinemática del combustible:  $\nu_f$
- Tensión superficial del combustible:  $\sigma_f$

Se tienen seis parámetros que contienen tres magnitudes fundamentales, de acuerdo con el teorema de Pi de Buckingham (teorema fundamental del análisis dimensional) podemos agrupar tres números dimensionales que describen el problema físico. Los grupos que controlan el proceso de atomización primaria son:

- El coeficiente de densidades

$$\varphi = \frac{\rho_g}{\rho_f} \quad (2.2)$$

- Número de Reynolds

$$Re = \frac{\phi_{ef} \cdot u_{ef} \cdot \rho_f}{\mu_f} = \frac{\phi_{ef} \cdot u_{ef}}{\nu_f} \quad (2.3)$$

- Número de Weber

$$We = \frac{\rho_f \cdot u_{ef}^2 \cdot \phi_{ef}}{\sigma_f} = \frac{2 \cdot \rho_f \cdot \sigma_f}{\rho_g} \quad (2.4)$$

Mientras que el número de Reynolds representa el coeficiente entre las fuerzas de inercia y las fuerzas viscosas en el interior de la vena líquida, el número de Weber determina la importancia relativa de la inercia del fluido, que ayudaría al proceso de atomización de la vena líquida, frente a su tensión superficial que se opondría a la rotura de la misma.

Adicionalmente, se podría sustituir cualquiera de los dos grupos anteriores por cualquiera de los dos siguientes, dependientes de ambos:

- Número de Taylor

$$Ta = \frac{Re}{We} = \frac{\sigma_f}{\mu_f \cdot u_{ef}} \quad (2.5)$$

- Número de Ohnesorge

$$Oh = \frac{\sqrt{We}}{Re} = \frac{\mu_f}{\sqrt{\rho_f \cdot \phi_{ef} \cdot \sigma_f}} \quad (2.6)$$

el primero caracteriza la importancia de las fuerzas centrífugas respecto a las fuerzas viscosas, y el último relaciona las fuerzas viscosas y las fuerzas de tensión superficial.

El coeficiente de densidades, el número de Weber, el número de Taylor y el número de Ohnesorge son parámetros de flujo externo, estos controlan la interacción del chorro líquido con la atmósfera circundante. Mientras que el número de Reynolds es un parámetro de flujo interno que controla la interacción entre el líquido y las paredes de la tobera [56].

#### 2.1.3.4 MECANISMOS QUE AFECTAN EN LA ATOMIZACIÓN DE LA VENA LÍQUIDA O ATOMIZACIÓN PRIMARIA

La atomización de la vena líquida se cree que es consecuencia de la superposición de diversos mecanismos independientes que pueden tener mayor o menor importancia relativa, en función de las condiciones de inyección.

##### **Ruptura debida a inestabilidades aerodinámicas.**

Es posible que cuanto mayor sea la velocidad relativa líquido-gas ambiente, el desarrollo de las perturbaciones en la superficie del chorro se incremente. Por lo que, el mecanismo que controla el *segundo régimen inducido por interacciones aerodinámicas* se reproduce: se forman finos ligamentos, debido a las pequeñas oscilaciones con las que se llena la vena líquida y disminuye el diámetro de la vena líquida según se aleja del inyector como consecuencia de esta pérdida de líquido. Los ligamentos se rompen por la acción de las fuerzas de tensión superficial y/o de la interacción aerodinámica con el gas ambiente. Investigadores como Lefèbvre [54] y Reitz y Bracco [55] han analizado teóricamente este mecanismo, apoyándose en el análisis lineal de Taylor. Se encuentra que para velocidades bajas de inyección este análisis lineal coincide con los resultados experimentales, pero a medida que la velocidad de inyección aumenta, la tasa de atomización y el ángulo de apertura de los chorros son menores que los obtenidos experimentalmente. Por lo que, se pone de manifiesto que existen otros efectos importantes que ayudan al proceso de atomización a altas velocidades de inyección.

##### **Turbulencia.**

Este mecanismo permite explicar la atomización de chorros inyectados en el vacío y de aquellos que no tienen posibilidad de interactuar aerodinámicamente con el ambiente. Autores como Ruiz y He [57] han descrito este fenómeno, el cual se genera en los orificios de la tobera del inyector, como una de las causas principales de la atomización. En el interior del orificio, la componente radial de la velocidad

turbulenta se encuentra comprendida entre las paredes del orificio y en la salida del inyector, esta componente expulsa el combustible fuera de la vena líquida, produciendo la atomización.

### **Cavitación.**

Otra de las causas importantes de la atomización está ligada a la cavitación, su influencia en el proceso puede ser de dos tipos. Por una parte, incrementa la turbulencia que, tal como se ha apuntado anteriormente, incrementa la atomización. Por otra parte, las burbujas de vapor presentes en el combustible hacen que ya en la salida del orificio se encuentre en flujo bifásico y además, inducirían discontinuidades en el líquido facilitando la división del chorro en ligamentos y gotas. Este fenómeno está fuertemente influenciado por las características geométricas del inyector así como de las condiciones de trabajo.

### **Relajación del perfil de velocidad.**

La modificación del perfil de velocidades del fluido justo a la salida del orificio es otro mecanismo que provoca la atomización de la vena líquida. Desaparecen los esfuerzos viscosos debido a la presencia de la pared del orificio y se produce inestabilidad debido a que el combustible cerca de la superficie de la vena líquida se acelera, dando lugar a la atomización.

Además de los mecanismos expuestos previamente, existe cierto acuerdo en que la relación entre la densidad del combustible y la del aire ambiente es otro parámetro que controla el proceso de atomización [53].

#### **2.1.3.5 PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DE LOS CHORROS DE INYECCIÓN**

La caracterización del chorro se realiza normalmente según dos puntos de vista: el macroscópico, el cual consiste en el análisis de las características geométricas

básicas del chorro, y el microscópico, donde se analizan las características internas del chorro. Desde el punto de vista macroscópico, en la Figura 2.6, se puede observar la *penetración del chorro* y el *ángulo de apertura del chorro*. Mientras que desde el punto de vista microscópico se puede definir la *distribución de diámetro de las gotas de combustible* y la *distribución de velocidad y concentración de las gotas de combustible*.

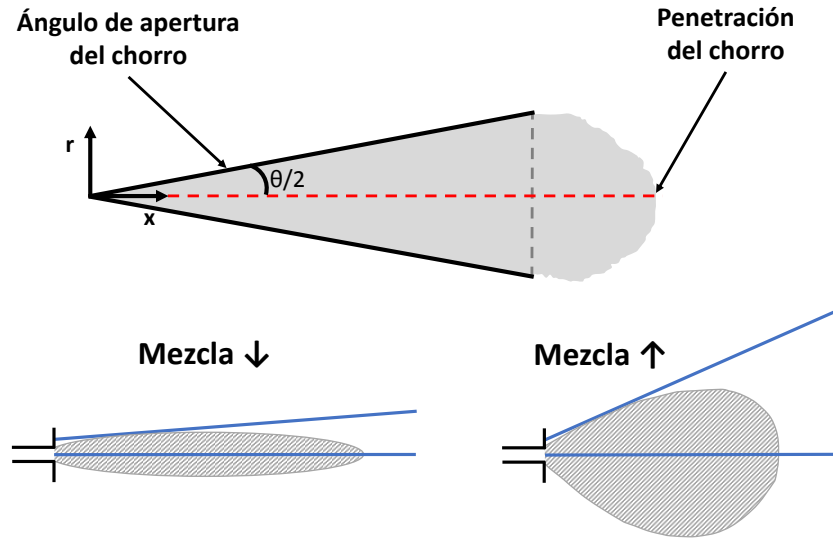


Figura 2.6: Parámetros macroscópicos del chorro de combustible.

### Penetración del chorro.

Se define como la distancia que recorre el frente del chorro en el seno del gas ambiente tomando como origen el orificio de salida de la tobera. Cabe resaltar que éste es de suma importancia en el estudio de los chorros, ya que determina en gran medida tanto el proceso de mezcla aire-combustible, así como el momento de impacto del chorro con las paredes de la cámara, factor que influye en mayor o menor medida en el desarrollo del proceso de combustión y la formación de emisiones.

Existen un gran número de correlaciones para determinar la penetración del chorro líquido atomizado en función del tiempo en condiciones no evaporativas. Hay y Jones [58] llevaron a cabo una revisión exhaustiva de la mayoría de las correlaciones que existían en ese momento para la penetración del chorro. En general, en todas

ellas se observa la dependencia de la penetración con la diferencia entre la presión de inyección y la presión de descarga, las características de la tobera, la relación de densidades entre el gas ambiente y el combustible, el ángulo del chorro, y el tiempo. Se destacan como mejores correlaciones las propuestas por Wakuri et al. [59] y Dent [60].

Wakuri et al. [59] propusieron una correlación para la penetración del chorro que relaciona las variables previamente descritas, la cual se define como:

$$S(t) = \frac{(2 \cdot C_d^3)^{1/4}}{(\tan(\theta/2))^{1/2}} \cdot \left(\frac{\Delta p}{\rho_g}\right)^{1/4} \cdot \phi_o^{1/2} \cdot t^{1/2} \quad (2.7)$$

donde  $C_d$  es el coeficiente de descarga,  $\theta$  es el ángulo de apertura del chorro,  $\Delta p$  es la diferencia de presión entre la presión de inyección y la presión de descarga o ambiente,  $\rho_g$  es la densidad del gas,  $\phi_o$  es el diámetro de la tobera y  $t$  es el tiempo transcurrido desde el inicio de la inyección. Se puede ver que cuanto mayor es el ángulo del chorro, menor es la penetración del mismo. Esto indica la relación estrecha que existe entre la penetración y el ángulo de apertura del chorro.

La correlación propuesta por Dent [60], para determinar la penetración del chorro y en la que también están relacionadas todas las variables antes reseñadas, se muestra a continuación:

$$S(t) = 3.07 \cdot \left(\frac{\Delta p}{\rho_g}\right)^{1/4} \cdot (t \cdot \phi_o)^{1/2} \cdot \left(\frac{294}{T_g}\right)^{1/4} \quad (2.8)$$

donde  $\Delta p$  es la diferencia de presión entre la presión de inyección y la presión de descarga,  $\rho_g$  es la densidad del gas,  $t$  es el tiempo transcurrido desde el inicio de la inyección,  $\phi_o$  es el diámetro de la tobera y  $T_g$  es la temperatura del gas.

### Ángulo de apertura del chorro.

El ángulo del chorro es otro parámetro característico importante desde el punto de vista de la mezcla entre el aire y el combustible. Este ángulo varía en función de



la geometría de la tobera del inyector y las condiciones de inyección, así como de las propiedades del combustible y de las condiciones ambientales donde se inyecta. No existe una definición exacta de lo que es, pero se suele definir como el ángulo que forman dos rectas que se ajustan al contorno del chorro, y que se cruzan en el orificio de salida del inyector. Este ángulo suele tener un valor entre  $5^\circ$  y  $30^\circ$ , y determina en gran medida la distribución macroscópica del combustible dentro de la cámara de combustión.

El incremento del ángulo disminuye la penetración y puede ocasionar interferencias entre chorros (en el caso de toberas multiorificio) dentro de la misma cámara, favoreciendo la coalescencia de gotas. Y si disminuye este ángulo por debajo de ciertos valores da lugar a una penetración excesiva, por lo que se tendría un choque contra la pared del bowl del pistón o con la propia cámara de combustión [45].

Naber y Siebers [61] llevaron a cabo una extensa revisión bibliográfica sobre la relación que diferentes autores han encontrado entre el ángulo de chorro y las condiciones de operación de chorros no evaporativos. En esta revisión realizada, la mayoría de los autores ponen de manifiesto la fuerte dependencia del ángulo de apertura del chorro con el coeficiente de densidades ( $\rho_g/\rho_f$ ), de la que dependen los fenómenos de interacción aerodinámica líquido-gas. Además, las diferentes correlaciones encontradas en la literatura para la tangente del semiángulo del chorro asocian un exponente para la relación de densidades que varía entre 0.18 a 0.5.

También afirmaron que el ángulo del chorro está relacionado con el englobamiento de aire del mismo. En efecto, un ángulo de chorro mayor es indicativo de que el englobamiento de aire también es mayor y por ende un mayor proceso de mezcla, (Figura 2.6). Según estos autores la tasa de englobamiento de aire depende:

$$\frac{dm_g}{dx} \propto \rho_g \cdot \phi_{ef} \cdot u_{ef} \cdot \tan(\theta/2) \quad (2.9)$$

donde  $m_g$  es el gasto másico de aire englobado por el chorro.

### Distribuciones de diámetros de las gotas.

El tamaño de las gotas de combustible depende de los mecanismos descritos anteriormente y de los diferentes procesos físicos que tienen lugar en el proceso de inyección. Los diámetros de las gotas de combustible presentan bastante dispersión y una gran inestabilidad espacial y temporal debido a que el proceso de inyección es transitorio. La caracterización de las distribuciones de los diámetros se suele utilizar algún diámetro medio característico, siendo el diámetro medio aritmético y el diámetro medio de Sauter (*Sauter mean diameter*, SMD) los más utilizados. Los cuales son representados por las siguientes expresiones de forma respectivas:

$$D_{10} = \frac{\sum_{i=1}^k D_i}{\sum_{i=1}^k N_i} \quad (2.10)$$

$$SMD = \frac{\sum_{i=1}^k D_i^3}{\sum_{i=1}^k D_i^2} \quad (2.11)$$

donde  $N_i$  es el número de gotas de la población con diámetro  $D_i$ .

El SMD puede ser caracterizado mediante la técnica de medida óptica PDA (*Phase Doppler Anemometry*) el cual, a parte de medir el diámetro de las gotas, proporciona información también sobre la velocidad de las mismas. El SMD está relacionado con la ley de frenado de las gotas de combustible y con la tasa de evaporación en el caso de condiciones evaporativas. Además, este parámetro puede relacionarse con el diámetro de las gotas de un chorro monodisperso que tuviera la misma relación volumen superficie del chorro polidisperso considerado [62].

En la literatura se encuentran diferentes trabajos, como el de Hiroyasu et al. [63], que ponen de manifiesto la existencia de una clara dependencia del SMD con diferentes parámetros del sistema de inyección y con las condiciones ambientales. Las principales conclusiones que se pueden sacar de estos trabajos es que disminuyendo el diámetro del orificio y aumentando la presión de inyección se consiguen diámetros de gota pequeños, por lo que se tendrá una mayor superficie de contacto del combustible

con el aire y así se obtendrán unas mejores condiciones para la combustión.

### **Distribución de velocidades y concentraciones de las gotas.**

La distribución de velocidades proporciona información sobre la ley de frenado relacionada con las fuerzas de inercia y aerodinámicas. Normalmente va ligada tanto teórica como experimentalmente a la distribución de diámetros de gotas.

La concentración de combustible depende de los mismos fenómenos físicos que la distribución de diámetros de gotas. Éste proporciona información sobre el proceso de englobamiento de aire, dando una medida del proceso de atomización en el caso de la fase líquida y del proceso de mezcla en la fase vapor [53].

En la literatura se encuentran diferentes trabajos, como el de Soare [64], en los que se estudian los perfiles axiales y radiales de velocidades y concentraciones de gotas. Como ejemplo, Correas [65] propone los siguientes perfiles radiales de tipo gaussiano tanto para la velocidad como para la concentración,

$$u = u_{eje} \cdot \exp(-4.6 \cdot r^*) \quad (2.12)$$

$$c = c_{eje} \cdot \exp(-4.6 \cdot S_c \cdot r^*) \quad (2.13)$$

donde  $S_c$  es el número de Schmidt, que representa el cociente entre el transporte de momento y el transporte de masa, y viene dado por el cociente entre la viscosidad cinemática,  $\nu_f$ , y el coeficiente de difusividad másica,  $D_f$ :

$$S_c = \frac{\nu_f}{D_f} \quad (2.14)$$

$r^* = r/R$  es la coordenada radial normalizada, donde  $R$  es el radio del cono del chorro. Las velocidades y concentraciones están expresadas respecto a los valores de éstos en el eje del chorro, los cuales seguirán una ley de tipo [66]

$$\frac{c_{eje}}{u_{eje}} = \frac{1}{u_0} \propto \frac{1}{x} \quad (2.15)$$

donde  $u_0$  es la velocidad de salida del chorro y  $x$  es la distancia desde el origen.

## 2.2 COMBUSTIBLES

### 2.2.1 DIÉSEL

Los combustibles tradicionales utilizados por los motores alternativos son líquidos y proceden del petróleo, siendo por lo tanto de origen fósil. La gasolina en el caso de los MEP, y el gasóleo o diésel, en el caso de MEC, constituyendo los principales productos de las refinerías propiedad de compañías petroleras. Su facilidad para el almacenamiento en condiciones ambientales y su gran densidad energética confieren al motor una gran autonomía y a su sistema de alimentación una relativa sencillez. Estas ventajas, junto con otras más específicas de cada tipo de motor, hacen que estos combustibles sean ventajosos para su consumo en motores de combustión interna alternativos (MCIA) en general, y en particular para su consumo en el sector de la automoción [67].

El petróleo constituye actualmente el origen de la cuarta parte de la energía primaria consumida en el mundo. Es una mezcla de hidrocarburos, principalmente líquidos pero que también contiene gases y sólidos, y que se almacena en yacimientos rocosos en algunas regiones del mundo [68]. Sus principales componentes son hidrocarburos alifáticos saturados o parafinas, hidrocarburos alifáticos insaturados, hidrocarburos cíclicos saturados o naftenos e hidrocarburos aromáticos, que a su vez pueden clasificarse en mono, di o poliaromáticos. También pueden encontrarse en el petróleo proporciones de hasta el 8% de azufre, tanto en forma de azufre elemental como de compuestos inorgánicos u orgánicos. Y también se encuentran proporciones

menores de compuestos oxigenados, nitrogenados y de organometálicos. La diferente volatilidad de todos estos componentes permite su separación por medio de destilación fraccionada, siendo ésta la principal operación realizada en las refinerías de petróleo [69].

El motor Diesel se concibió para funcionar con aceites vegetales y polvo de carbón, los primeros prototipos se alimentaron con queroseno, que por aquel entonces constituía el producto mayoritario de la destilación del petróleo. Sin embargo, cuando se desarrollaron los sistemas de inyección a alta presión (años 20), pasó a consumirse una fracción del crudo destilada a mayor temperatura, a la que se denominó gasóleo [45].

El gasóleo, diésel o gasoil es un hidrocarburo líquido compuesto por un 75 % de hidrocarburos saturados, principalmente parafinas incluyendo isoparafinas y cicloparafinas, y un 25 % de hidrocarburos aromáticos, incluyendo naftalenos y alcaobencenos. Su densidad a 15 °C se encuentra entre 820 y 845  $kg/m^3$ , su viscosidad cinemática a 40 °C entre 2 y 4.5  $mm^2/s$  y su número de cetano entre 45 y 50 [70].

### 2.2.2 BIOCOMBUSTIBLES

Los biocombustibles son recursos energéticos procesados por el ser humano a partir de materias producidas por seres vivos a las cuales se les denomina biomasa. Pueden ser líquidos, sólidos o gaseosos, y su última finalidad es liberar la energía contenida en sus componentes químicos mediante reacciones de combustión. Existen varios biocombustibles, a los cuales se les clasifica de acuerdo al insumo o materia prima y a la tecnología empleada para producirlos [14]. Debido a los avances en la tecnología, esta clasificación se realiza por generación.

#### **Primera generación.**

La materia prima es de procedencia agrícola y están constituidos por las partes

alimenticias de las plantas, las cuales tienen un alto contenido de almidón, azúcares y aceites. Ejemplo de éstas son el jugo de la caña de azúcar, los granos de maíz, el jugo de la remolacha, el aceite de semilla de algodón, el aceite de coco, el aceite de cacahuete, entre otras. Otras materias primas que se utilizan son las grasas animales, grasas y aceites de desecho proveniente de la cocción y elaboración de alimentos, y desperdicios sólidos orgánicos.

Los biocombustibles se producen empleando tecnología tradicional como la fermentación, transesterificación y la digestión anaeróbica. De estos procesos se obtiene etanol, metanol, n-butanol a partir de azúcares y carbohidratos, biodiésel a partir de aceites y grasas, y biogás a partir de desperdicios orgánicos.

Las ventajas de estos biocombustibles son sus bajas emisiones de gases de efecto invernadero, un balance positivo en dichas emisiones y su facilidad de procesamiento, pero tiene como desventaja el desvío de alimentos provenientes de la agricultura hacia el sector energético [71].

### **Segunda generación.**

La materia prima, generalmente no comestible, está compuesta principalmente por celulosa, como los residuos agrícolas y forestales. Ejemplo de éstas son el bagazo de la caña de azúcar, el rastrojo de maíz, la paja de trigo, el aserrín, las hojas y las ramas secas de árboles, etc.

Los biocombustibles de segunda generación tienen un nivel de complejidad mayor que los de primera generación, como ejemplos predominan la sacarificación-fermentación y el proceso Fischer-Tropsch. Éste último también recibe los nombres de proceso GTL (*Gas To Liquids*) y proceso BTL (*Biomass To Liquids*), los cuales se basan en la gasificación del carbón y de la materia lignocelulósica de la biomasa, que es el principal componente de la pared celular de las plantas, para después sintetizar algún combustible líquido como el etanol. Con los procesos de segunda generación se obtiene etanol, metanol, gas de síntesis, biodiésel, DMF (*2,5-dimetilfurano*), entre otros.

La principal ventaja de estos combustibles es la ausencia del desvío de recursos alimenticios hacia la producción de recursos energéticos, pero su desventaja es el poco beneficio en disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero durante el procesamiento de las materias primas, respecto a los biocombustibles de primera generación [72].

### **Tercera generación.**

Los insumos son vegetales no alimenticios con una gran capacidad de crecimiento rápido y potencial energético. Entre estas materias primas están los pastos perennes, los árboles y las plantas de rápido crecimiento, y las algas verdes y verdeazules.

Las ventajas de estos combustibles son la utilización de dióxido de carbono para la producción de las materias primas y un balance positivo en la emisión de gases de efecto invernadero, pero su desventaja es la utilización de tierras de cultivo de alimentos para sembrar estas materias primas, con la excepción de las algas verdes [73].

### **Cuarta generación.**

Los biocombustibles de cuarta generación se producen a partir de bacterias genéticamente modificadas, las cuales emplean dióxido de carbono o alguna otra fuente de carbono para la obtención de los biocombustibles.

En esta generación de biocombustibles, la bacteria es la que efectúa la totalidad del proceso de producción de los biocombustibles, a diferencia de las generaciones anteriores, en las que también se pueden utilizar bacterias y organismos genéticamente modificados como materia prima o para realizar algunas partes de los procesos.

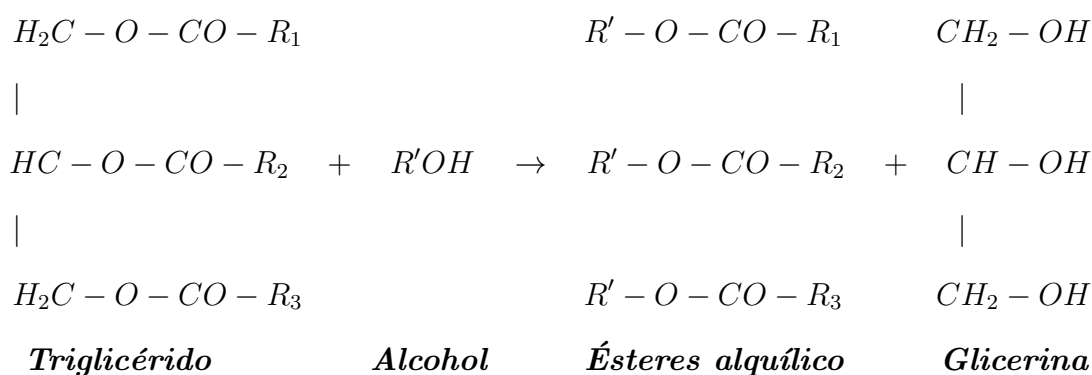
Actualmente esta generación de biocombustibles se encuentra en fase teórica, sólo se conoce la posible ruta de síntesis del etanol a partir de dióxido de carbono, sin embargo, depende totalmente de la información genética de una bacteria artificial y puede tener limitaciones termodinámicas importantes [74].

## 2.2.2.1 BIODIÉSEL

El triacilglicerol o triglicérido son los componentes principales de aceites vegetales y grasas animales. Químicamente, los triglicéridos son ésteres de ácidos grasos unidos a glicerina (*1,2,3-propanotriol*). Los triglicéridos de aceites vegetales y de grasas animales contienen habitualmente varios ácidos grasos diferentes, por lo que se pueden unir diferentes ácidos grasos a un esqueleto de glicerina. Los diferentes ácidos grasos contenidos en los triglicéridos tienen diferentes propiedades físicas y químicas, la composición de estos es probablemente el parámetro más importante que influye en las propiedades de un aceite vegetal o de una grasa animal [75].

Para obtener biodiésel, los aceites vegetales o las grasas animales se someten a una reacción química denominada *transesterificación*. En esta reacción, el aceite vegetal o la grasa animal reacciona en presencia de un catalizador, generalmente una base (*KOH* o *NaOH*), con un alcohol, usualmente metanol (*CH<sub>3</sub>OH*), para dar los correspondientes ésteres alquílicos de la mezcla de ácidos grasos que se encuentran en el aceite vegetal o en la grasa animal.

A continuación, se muestra la reacción de transesterificación:



donde  $R_1$ ,  $R_2$  y  $R_3$  representan diferentes cadenas de ácidos grasos y pueden ser o no idénticas.

El biodiésel puede ser producido a partir de una gran variedad de materias



primas. Ejemplos de éstas son el aceite de soya, el aceite de semillas de algodón, el aceite de palma, el aceite de cacahuete, el aceite de colza, el aceite de girasol, el aceite de cártamo, el aceite de coco, el aceite usado de cocina, el sebo de res, entre otras. Dependiendo del origen y de la calidad de la materia prima, pueden ser necesarios cambios en el proceso de producción [76].

El biodiésel es miscible con el diésel en todas las proporciones. Esto ha llevado al uso de mezclas de diésel con biodiésel en lugar de biodiésel puro en muchos países. A estas mezclas no se las denomina biodiésel, como tampoco a los aceites vegetales y a las grasas animales no esterificadas [77].

El uso de metanol para la producción de biodiésel es debido a que es el alcohol menos costoso, aunque otros alcoholes, como por ejemplo el etanol o el iso-propanol, pueden producir un biodiésel con mejores propiedades. A menudo al producto resultante también se le denomina Ésteres Metílicos de Ácidos Grasos (*Fatty Acid Methyl Esters*, FAME) en lugar de biodiésel. Aunque con otros alcoholes se puede obtener biodiésel, muchas de las normas actualmente existen están definidas de tal forma que sólo los ésteres metílicos puedan ser usados como biodiésel [76].

El biodiésel tiene varias ventajas frente al diésel, además de ser totalmente competitivo con el diésel en la mayoría de los aspectos técnicos [78]:

- Derivado de un recurso renovable, reduciendo así la dependencia y preservación del petróleo.
- Biodegradabilidad.
- Reduce la mayoría de las emisiones de gases de escape reguladas, con la excepción de los  $NO_x$ .
- Mayor punto de inflamación que conduce a un manejo y almacenamiento más seguro.
- Excelente lubricidad. Este hecho está ganando cada vez más importancia con

la aparición de los combustibles diésel con bajo contenido en azufre, que han reducido significativamente la lubricidad. La adición de biodiésel a niveles bajos restablece la lubricidad.

Algunas desventajas asociadas al biodiésel son el alto costo permanente, el incremento ligero en las emisiones de  $NO_x$ , la estabilidad oxidativa cuando se expone a un flujo de aire y las propiedades de flujo en frío. El alto costo puede ser parcialmente compensado por el uso de materias primas menos costosas como los aceites usados [14].

Para usar el biodiésel como combustible o para mezclar con diésel debe cumplir varias especificaciones técnicas, éstas se encuentran recogidas en la norma europea EN 14214 [79] y en la norma estadounidense ASTM D6751 [80]. Estas normas abordan una variedad de problemas de calidad del combustible causados por las propiedades de los principales componentes del combustible, los ésteres monoalquílicos de ácidos grasos, y por la presencia de contaminantes. En la Tabla 2.1 se enumeran las especificaciones actuales seleccionadas en las dos normas antes mencionadas.

Las propiedades del biodiésel que están influenciadas en gran medida por la composición de los ésteres grasos son la viscosidad cinemática, el número de cetano y otras propiedades relacionadas con la combustión, además del flujo en frío, la estabilidad oxidativa y la densidad. La lubricidad no es un problema de rendimiento con el biodiésel, sólo está influenciada marginalmente por el perfil de ácido graso [81].

La viscosidad cinemática es la propiedad de los compuestos grasos que es en gran medida la causante de la producción de biodiésel, por lo que es una de las principales razones por las cuales los aceites vegetales puros han sido en gran medida abandonados como combustible alternativo para el diésel [82].

La viscosidad no sólo afecta el flujo a todas las temperaturas a las que un combustible puede estar expuesto, sino que también influye fuertemente en la ato-

Tabla 2.1: Especificaciones técnicas seleccionadas en las normas de biodiésel ASTM D6751 y EN 14214.

| Especificación               | ASTM D6751                                 |                | EN 14214                     |                               |
|------------------------------|--|----------------|------------------------------|-------------------------------|
|                              | Límite                                     | Método         | Límite                       | Método                        |
| <b>Viscosidad cinemática</b> | 1.9 - 6.0 mm <sup>2</sup> /s               | D445           | 3.5 - 5.0 mm <sup>2</sup> /s | EN ISO 3104                   |
| <b>Número de cetano</b>      | 47 mínimo                                  | D613,<br>D6890 | 51 mínimo                    | EN ISO 5165                   |
| <b>Punto de nube</b>         | Informe                                    |                | <sup>b</sup>                 |                               |
| <b>Estabilidad oxidativa</b> | 3 horas mínimo                             | EN 14112       | 8 horas mínimo               | EN 14112,<br>EN 15751         |
| <b>Densidad</b>              | -  | -              | 860-900 kg/m <sup>3</sup>    |                               |
| <b>Glicerina libre</b>       | 0.02 % de masas máximo                     | D6584          | 0.02 % de masas máximo       | EN 14105                      |
| <b>Monoglicéridos</b>        | 0.4 % de masa máximo                       | D6584          | 0.7 % de masas máximo        | EN 14105                      |
| <b>Total de glicerina</b>    | 0.24 % de masa máximo                      | D6584          | 0.25 % de masas máximo       | EN 14105                      |
| <b>Índice de acidez</b>      | 0.5 mg KOH/g máximo                        | D664           | 0.5 mg KOH/g máximo          | EN 14104                      |
| <b>Conjunto NaK</b>          | 5 ppm máximo                               | EN 14538       | 5 mg/kg máximo               | EN 14108,<br>EN 14109         |
| <b>S (Azufre)</b>            | 0.015 ó 0.05 % de masa máximo <sup>a</sup> | D5453          | 10 mg/kg                     | EN ISO 20846,<br>EN ISO 20884 |
| <b>P (Fósforo)</b>           | 0.001 % de masa máximo                     | D4951          | 4 mg/kg                      | EN 14107                      |
| <b>Conjunto CaMg</b>         | 5 ppm                                      | EN 14538       | 5 mg/kg                      | EN 14538                      |

<sup>a</sup> Depende de la calidad del diésel con el que se mezcle.

<sup>b</sup> Punto de obstrucción de filtros en frío con diferentes límites dependiendo de la geografía y la época del año.

mización del combustible al inyectarse en la cámara de combustión y la posible formación de depósitos en el motor. Cuanto mayor es la viscosidad, mayor es la tendencia del combustible a causar tales problemas. La viscosidad cinemática está incluida en la mayoría de las normas de biodiésel y ésta puede ser determinada por métodos como ASTM D445 o EN ISO 3104, como se puede observar en la Tabla 2.1 [83].

#### 2.2.2.2 BIOETANOL

Los carbohidratos, también conocidos como glúcidos, hidratos de carbono o sacáridos, están compuestos por carbono, hidrógeno y oxígeno que resultan ser la forma biológica primaria de almacenamiento y consumo de energía. Estos incluyen azúcares, almidones, celulosa, y muchos otros compuestos que se encuentran en los organismos vivos [84]. De acuerdo a la cantidad de moléculas que intervienen en su formación se distinguen diferentes tipos de carbohidratos:

- Monosacáridos: Una molécula.
- Disacáridos: Combinación de dos monosacáridos.
- Oligosacáridos: Combinación de entre tres y nueve monosacáridos.
- Polisacáridos: Combinación de más de diez monosacáridos.

Estos tres últimos son azúcares complejos, mientras que los monosacáridos son azúcares simples [85].

El bioetanol es una energía renovable, que se produce por la *fermentación*, *destilación* y *deshidratación* de los azúcares simples, estos se encuentran de forma directa en plantas como la melaza, la caña de azúcar y la remolacha. El maíz, el trigo, la cebada, el sorgo, la madera, los residuos de poda y los residuos sólidos urbanos (RSU) están compuestos por azúcares complejos, por lo que se necesita realizar

un proceso previo de *hidrólisis* a estas materias primas para obtener azúcares más simples y así poder ser fermentados, destilados y deshidratados [70]. En la Figura 2.7 se muestran los procesos a seguir para la obtención de bioetanol a partir de azúcares, cereales y biomasa.

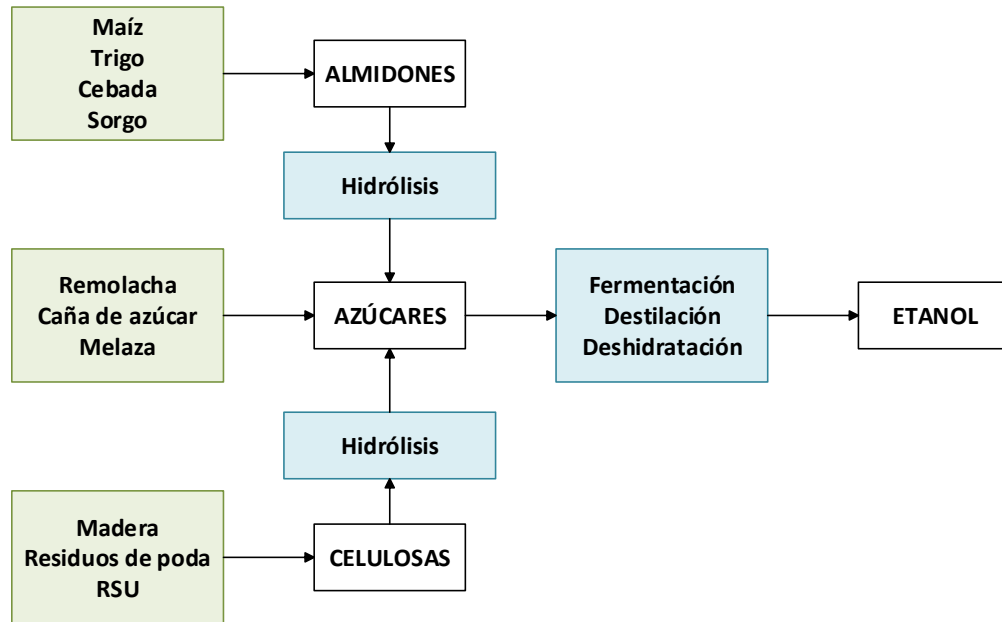
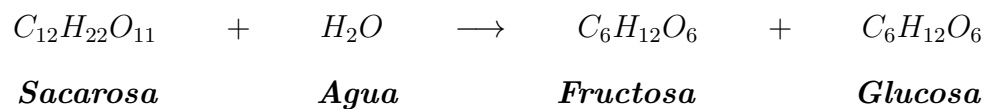
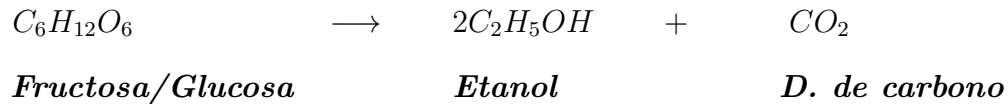


Figura 2.7: Proceso producción de bioetanol.

El proceso de *fermentación* se lleva a cabo principalmente por la levadura *Saccharomyces cerevisiae*. Se trata de un organismo facultativo fermentativo, lo cual implica que puede transformar los azúcares en  $CO_2$  y agua, bajo condiciones adecuadas de  $O_2$ , o generar grandes cantidades de bioetanol en ausencia de éste. La levadura contiene una enzima llamada invertasa, que actúa como catalizador ayudando a convertir los azúcares complejos en glucosa y fructosa (ambos  $C_6H_{12}O_6$  y monosacáridos) [86]. La reacción química es la siguiente [87]:



la fructosa y la glucosa reaccionan con otra enzima llamada zimasa, que también está presente en la levadura para producir etanol y dióxido de carbono:



La solubilidad del bioetanol en el diésel se ve afectada principalmente por la temperatura y el contenido de agua de la mezcla. A temperaturas cálidas el bioetanol seco se mezcla con facilidad con el diésel, pero aproximadamente por debajo de los 10° C los dos combustibles se separan. La prevención de esta separación puede realizarse de dos maneras: añadiendo un emulsionante que actúa suspendiendo pequeñas gotas de bioetanol dentro del combustible diésel o añadiendo un solvente que actúa como agente puente a través de la compatibilidad molecular y la unión para producir una mezcla homogénea [88].

La mezclas de bioetanol con diésel genera modificaciones en las propiedades de éste. El número de cetano, la viscosidad cinemática, la densidad y la tensión superficial se ven reducidas con el aumento del % en vol. de bioetanol en la mezcla. Estas modificaciones producen cambios en las características de pulverización y atomización, en el rendimiento de la combustión y en las emisiones del motor [89].

## 2.3 CORRELACIONES PARA EL CÁLCULO DE PROPIEDADES DE COMBUSTIBLES

El chorro de combustible está típicamente influenciado por doce propiedades termo-físicas y de transporte, además de sus propiedades críticas, de estas doce propiedades, la viscosidad, la densidad y la tensión superficial son tres de las propiedades más relevantes en el proceso de la formación del chorro, la combustión y las emisiones, y éstas varían en función del porcentaje de los componentes que constituyen la mezcla, como se vio en la Sección 1.2. Por otro lado, también se vio que el número de cetano es una de las propiedades que determina la calidad global del combustible, e igualmente varía acorde al porcentaje de los componentes.

Debido a la complejidad de la composición de las mezclas no es posible medir o calcular con exactitud estas cuatro propiedades. Por lo tanto, se han desarrollado métodos especiales o correlaciones para estimar estas propiedades de los combustibles. A continuación, se muestran las correlaciones que permiten el cálculo de la densidad, la viscosidad, la tensión superficial y el índice de cetano de las mezclas.

### 2.3.1 VISCOSIDAD CINEMÁTICA

Las siguientes ecuaciones pueden ser usadas para calcular la viscosidad líquida del combustible a presión atmosférica y a una temperatura de  $100\text{ }^{\circ}F$  ( $\approx 40\text{ }^{\circ}C$ ) y de  $210\text{ }^{\circ}F$  ( $\approx 100\text{ }^{\circ}C$ ), con un rango de error de cálculo de entre el 5 y el 10% [90]:

$$\begin{aligned} \log \nu_{40} = & 4.39371 - 1.94733 \cdot K + 0.127690 \cdot K^2 + 3.2629 \cdot 10^{-4} \cdot API^2 \\ & - 1.18246 \cdot 10^{-2} \cdot K \cdot API \\ & + \frac{0.17161 \cdot K^2 + 10.9943 \cdot API + 9.50663 \cdot 10^{-2} \cdot API^2 - 0.860218 \cdot K \cdot API}{API + 50.3642 - 4.78231 \cdot K} \end{aligned} \quad (2.16)$$

$$\begin{aligned} \log \nu_{100} = & -0.463634 - 0.166532 \cdot API + 5.13447 \cdot 10^{-4} \cdot API^2 - 8.48995 \cdot 10^{-3} \cdot K \cdot API \\ & + \frac{8.0325 \cdot 10^{-2} \cdot K + 1.24899 \cdot API + 0.197680 \cdot API^2}{API + 26.786 - 2.6296 \cdot K} \end{aligned} \quad (2.17)$$

donde  $\nu_{40}$  y  $\nu_{100}$  son la viscosidad cinemática a  $\approx 40$  y  $\approx 100\text{ }^{\circ}C$ , en  $cSt$  (centistokes),  $API$  es la gravedad API y  $K$  es el factor de caracterización de Watson.

La gravedad API se puede determina mediante la siguiente ecuación:

$$API = \frac{141.5}{GE} - 131.5 \quad (2.18)$$

donde  $GE$  es la gravedad específica 60/60 °F ( $GE$ ) obtenida con la ayuda de la norma ASTM D1298 – 99 [91], véase Sección 3.4.

Y el factor de caracterización de Watson viene dado por:

$$K = \frac{MeABP^{1/3}}{GE} \quad (2.19)$$

donde  $MeABP$  es el punto de ebullición promedio medio, en grados Rankine. Éste se puede calcular mediante la siguiente ecuación:

$$MeABP = VABP - \Delta \quad (2.20)$$

$VABP$  es el punto de ebullición promedio volumétrico y puede calcularse como el promedio de las cinco temperaturas de ebullición a 10, 30, 50, 70 y 90% destilado,

$$VABP = \frac{T_{10} + T_{30} + T_{50} + T_{70} + T_{90}}{5} \quad (2.21)$$

donde todas las temperaturas están en °F y las temperaturas de ebullición son obtenidas mediante la norma ASTM D86 – 04 [92], véase Sección 3.3.

Y por último, el parámetro  $\Delta$  viene dado por:

$$\ln \Delta = -0.94402 - 0.00865 \cdot (VABP - 32)^{0.6667} + 2.99791 \cdot \left[ \frac{T_{90} - T_{10}}{90 - 10} \right]^{0.333} \quad (2.22)$$

### 2.3.2 TENSION SUPERFICIAL

Riazi y Al-Sahhaf [93] presentaron un método para el cálculo de diferentes propiedades sólo con el uso del peso molecular ( $M$ ), entre estas propiedades se encuentra



la tensión superficial. Por lo que, ésta puede ser determinada mediante la siguiente ecuación:

$$\sigma_{25} = 30.3 - \exp(17.45018 - 9.70188 \cdot M^{0.1}) \quad (2.23)$$

donde  $\sigma_{25}$  es la tensión superficial a 25 °C, en *dynes/cm*. El error esperado con el uso de esta ecuación está entre el 0.25 y el 1.7 %.

El peso molecular se puede predecir a través de la siguiente ecuación [90]:

$$M = 42.965[\exp(2.097 \cdot 10^{-4} \cdot MeABP - 7.78712 \cdot GE + 2.08476 \cdot 10^{-3} \cdot MeABP \cdot GE)] \cdot MeABP^{1.26007} \cdot GE^{4.98308} \quad (2.24)$$

donde *MeABP* está en grados Kelvin.

### 2.3.3 DENSIDAD

La densidad a 20 °C es otra de las propiedades que se puede calcular mediante el método de Riazi y Al-Sahhaf [93], el error obtenido con el uso de esta ecuación está por debajo del 0.5 %:

$$\rho_{20} = 1.05 - \exp(3.80258 - 3.12287 \cdot M^{0.1}) \quad (2.25)$$

donde  $\rho_{20}$  está en *g/m<sup>3</sup>*. También se puede determinar la densidad a 60 °F ( $\approx 15$  °C) con la gravedad específica 60/60 °F:

$$\rho_{15} = GE \cdot \rho_{Agua} \quad (2.26)$$

donde  $\rho_{Agua}$  es la densidad del agua a 15 °C y es igual a 999.016 *Kg/m<sup>3</sup>*.

### 2.3.4 ÍNDICE DE CETANO

El índice de cetano calculado por cuatro variables (ASTM D4737 – 96a) proporciona un medio para estimar el número de cetano ASTM D613 de combustibles destilados a partir de la densidad y de las temperaturas de recuperación. El valor calculado a partir de la siguiente ecuación se denomina índice de cetano calculado por cuatro variables [94]:

$$IC = 45.2 + 0.0892 \cdot T_{10N} + (0.131 + 0.901 \cdot B) \cdot T_{50N} + (0.0523 - 0.420 \cdot B) \cdot T_{90N} + 0.00049 \cdot (T_{10N}^2 - T_{90N}^2) + 107 \cdot B + 60 \cdot B^2 \quad (2.27)$$

donde:

- $T_{10N} = T_{10} - 215$ ;  $T_{10}$  es la temperatura de recuperación del 10 % del volumen destilado, °C, determinada por la norma ASTM D86 – 04 y corregida a la presión barométrica.
- $T_{50N} = T_{50} - 260$ ;  $T_{50}$  es la temperatura de recuperación del 50 % del volumen destilado, °C, determinada por la norma ASTM D86 – 04 y corregida a la presión barométrica.
- $T_{90N} = T_{90} - 310$ ;  $T_{90}$  es la temperatura de recuperación del 90 % del volumen destilado, °C, determinada por la norma ASTM D86 – 04 y corregida a la presión barométrica.
- $B = [\exp(-3.5 \cdot (\rho_{15} - 0.85))] - 1$

El error esperado para los números de cetano, que se encuentren entre el rango de 32.5 y 56.5, es menor a  $\pm 2$ .

## CAPÍTULO 3

# HERRAMIENTAS EXPERIMENTALES

---

*En este capítulo se presentan las herramientas experimentales utilizadas en la realización de este estudio. En primer lugar, se describe la maqueta de visualización a volumen constante. Después, se detalla la técnica óptica de iluminación directa por dispersión MIE, junto con la obtención de la resolución espacial y el procesamiento de imágenes. Y por último, se describe el método de destilación a presión atmosférica y el método de obtención de gravedad específica con la ayuda de las normas ASTM D86 – 04 y ASTM D1298 – 99, respectivamente.*

### 3.1 INSTALACIÓN EXPERIMENTAL: MAQUETA DE VISUALIZACIÓN A VOLUMEN CONSTANTE

Para determinar los parámetros macroscópicos de las mezclas seleccionadas se hace uso de la **maqueta de visualización a volumen constante** que se encuentra en el área de fenómenos de transporte del Laboratorio de Investigación e Innovación en Tecnología Energética (LIITE) de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, en la Universidad Autónoma de Nuevo León. Esta instalación experimental está constituida por una *cámara a volumen constante* y un *sistema de inyección* [95]. En la Figura 3.1 se muestra la maqueta de visualización a volumen constante.

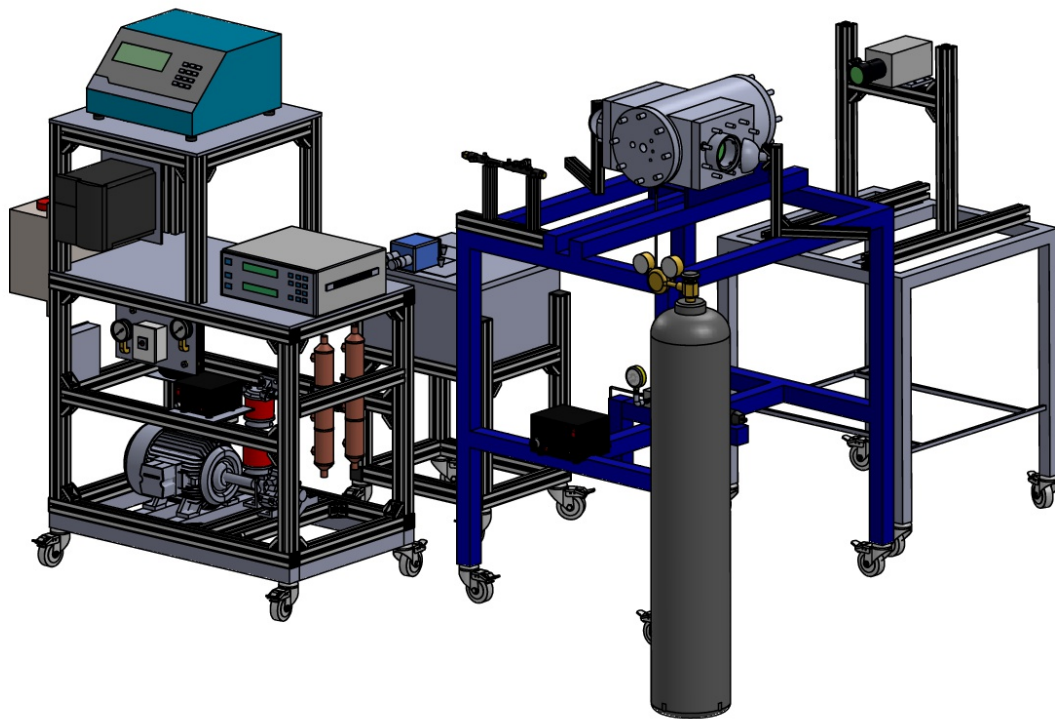


Figura 3.1: Maqueta de visualización a volumen constante.

### 3.1.1 CÁMARA A VOLUMEN CONSTANTE

La cámara a volumen constante fue diseñada y construida por el grupo de investigación. Esta cámara permite, gracias a sus accesos ópticos visualizar el proceso transitorio de inyección de un combustible, ya sea fósil o biocombustible, asimismo permite reproducir condiciones termodinámicas semejantes a las que se desarrollan en la cámara de combustión de un motor de combustión interna en funcionamiento ordinario. En la Figura 3.2 se muestra la cámara a volumen constante.

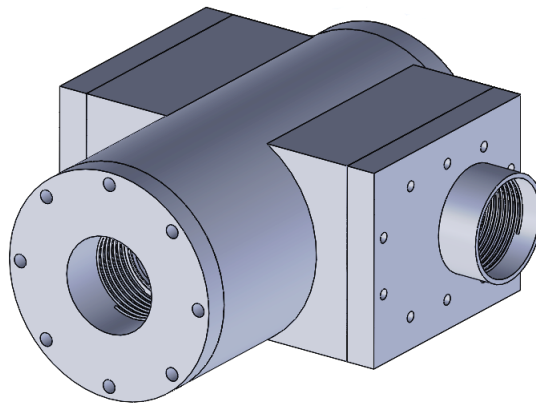


Figura 3.2: Cámara a volumen constante.

La cámara consiste en una cámara cilíndrica hecha de acero al carbón con un largo de 40.32 cm, un diámetro de 23.50 cm y un espesor de 6 cm, incluye dos placas laterales de 24.13 cm de largo por 20.32 cm alto por 7.50 cm de ancho y una placa trasera y otra delantera ambas de 23.50 cm de diámetro y un espesor de 5.08 cm y 9.61 cm, respectivamente.

Las dos placas laterales y la placa delantera cuentan con un acceso óptico de 8 cm de diámetro, estos están compuestos por ventanas de zafiro que soportan una presión de hasta 180 bar. En la placa trasera se encuentran ubicados el inyector, la alimentación de nitrógeno, un sensor de temperatura y un sensor de presión, para la medida de estas propiedades del gas que se encuentra dentro de la cámara a volumen constante. La lectura de estos dos sensores se envía a un sistema de control

y adquisición de datos NI CompactRIO, para después ser tratada y monitorizada mediante un programa realizado en Labview™, con interfaz gráfica de usuario.

Como medida de seguridad, la cámara a volumen constante cuenta con una salida para el gas que se encuentra dentro, ésta conecta con una conexión de acero de cuatro vías de acceso. La conexión consta de un acceso superior que es dónde se conecta la salida de la cámara, y otros tres accesos laterales en los que se encuentran conectados un válvula de alivio, una válvula de abuja y un manómetro.

### 3.1.2 SISTEMA DE INYECCIÓN

El proceso de inyección es controlado con un sistema auxiliar de inyección, también diseñado por el grupo de investigación y que puede alcanzar hasta los 1300 bar de presión de inyección. En la Figura 3.3 se muestra el esquema del sistema de inyección y en la Tabla 3.1 se encuentran enumerados los componentes de éste.

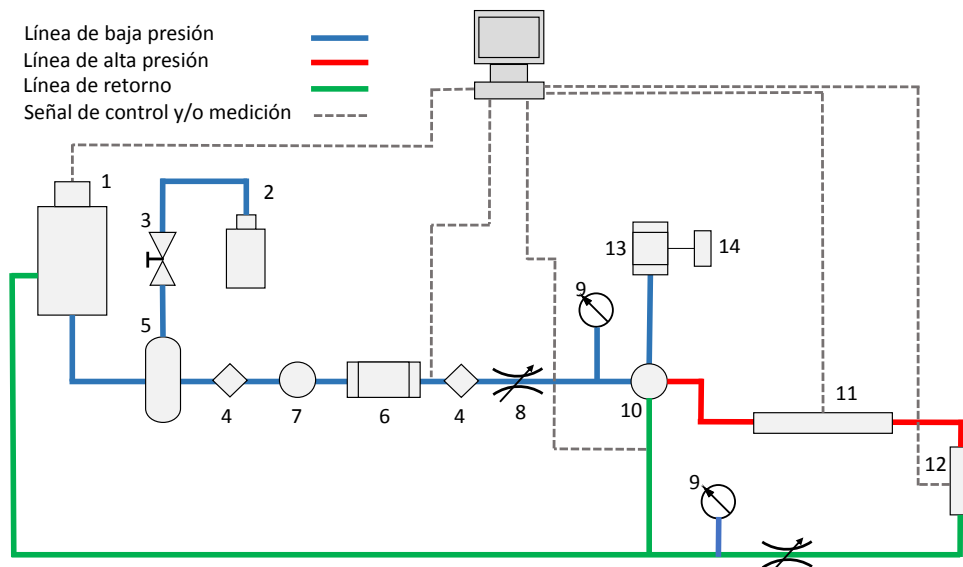


Figura 3.3: Esquema del sistema de inyección.

El sistema está compuesto de dos circuitos, uno de *alta presión*, que consta de un inyector, un sistema common rail, una bomba de alta presión, un motor eléctri-

Tabla 3.1: Componentes sistema de inyección

|                           |                           |
|---------------------------|---------------------------|
| 1 Depósito de combustible | 8 Regulador de presión    |
| 2 Depósito de residuos    | 9 Manómetro               |
| 3 Válvula manual          | 10 Bomba de alta presión  |
| 4 Filtro                  | 11 Common rail            |
| 5 Purgador                | 12 Inyector               |
| 6 Intercambiador de calor | 13 Motor trifásico        |
| 7 Bomba de baja presión   | 14 Variador de frecuencia |

co y un variador de frecuencia para controlar su velocidad, y otro de *baja presión* compuesto por un depósito de combustible, un depósito de residuos, dos filtros de combustible, una bomba de baja presión, un intercambiador de calor y un regulador de presión. Además, está equipado con dos sensores de temperatura, uno toma la lectura de la temperatura del combustible de retorno de la bomba de alta presión y el otro de la temperatura del depósito de combustible. Ambos valores son adquiridos, tratados y monitorizados de igual forma que los valores de temperatura y de presión del gas del interior de la cámara a volumen constante.

El sistema está controlado por un *common rail tester system* que es capaz de simular las salidas de control de la ECU. Permite controlar de forma manual los siguientes parámetros:

- Presión del common rail ( $P_{rail}$ ). Presión generada por la bomba de alta presión y enviada hacia el common rail.
- Pulso eléctrico ( $W$ ). Tiempo que el inyector permanece abierto.
- Frecuencia de inyección ( $N$ ). Número de inyecciones por minuto.

El inyector que se encuentra instalado es de la marca *Denso* con un número de serie *DCRI105189*, el cual cuenta con siete orificios cilíndricos con un diámetro de  $145 \pm 1 \mu\text{m}$  y una inclinación del chorro de  $73^\circ$  cada uno [96].

### 3.2 TÉCNICA ÓPTICA: ILUMINACIÓN DIRECTA POR DISPERSIÓN MIE

Con la finalidad de obtener los parámetros macroscópicos se emplea la técnica óptica de *iluminación directa por dispersión MIE*, la cual consiste en la obtención de imágenes del chorro líquido al ser éste iluminado de manera directa por un haz de luz, que se obtiene de una fuente continua de luz [97]. En la Figura 3.4 se muestra el montaje experimental para la aplicación de la técnica de iluminación directa por dispersión MIE, donde se observa que el sistema de adquisición de imágenes está compuesto por una cámara, un sistema de iluminación y un sistema que sincroniza el disparo de la cámara con el pulso del inyector.

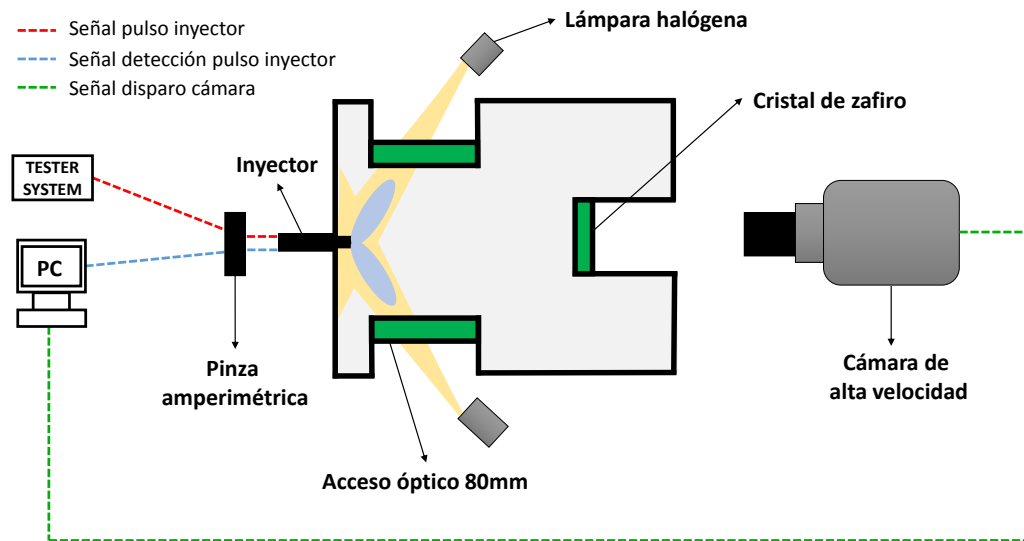


Figura 3.4: Técnica óptica: Iluminación directa por dispersión MIE.

La cámara es digital de alta velocidad, modelo Motion PRO X4 CMOS, con una capacidad de adquisición de 5130 *imágenes/segundos*, sensor tipo CMOS y un rango dinámico de 8 bit. Ésta cuenta con un objetivo Nikon 60 *mm*. El sistema de iluminación está compuesto por 2 lámparas halógenas con una potencia de 100 *W* y un voltaje de 12 *V*. Como se ha comentado previamente, el haz de luz producido por el sistema de iluminación incide de manera directa en el chorro líquido, provocando



un reflejo de éste que es recogido por el sensor de la cámara [95].

La sincronización de la adquisición de imágenes se lleva a cabo mediante la detección de forma automática del pulso de corriente que le llega a la bobina del inyector, que es medida mediante una pinza amperimétrica modelo i310s de la marca Fluke. La señal generada por la pinza es analizada por un sistema de control y adquisición de datos NI CompactRIO, que detecta automáticamente el flanco de subida y envía los pulsos de sincronización a la cámara de alta velocidad [98].

### 3.2.1 OBTENCIÓN DE LA RESOLUCIÓN ESPACIAL

Antes de la realización de los ensayos se toma una imagen de referencia de una escala graduada situada en el interior de la cámara a volumen constante y centrada con la punta del inyector. Dónde a partir de esta imagen se calcula la resolución espacial en *pixel/mm*, que es un parámetro necesario para obtener las medidas reales de los parámetros macroscópicos del chorro. Para obtener la relación *pixel/mm* se siguen los siguientes pasos [95]:

- Se coloca una cuadrícula de dimensiones conocidas en el interior de la maqueta a volumen constante y centrada con la punta del inyector.
- Posteriormente se toma una foto y se anotan las coordenadas de dos puntos ( $[X_1, Y_1]$  y  $[X_2, Y_2]$ ) que se encuentren en una misma línea horizontal de la cuadrícula, véase Figura 3.5.
- Finalmente, se comprueba que los dos puntos se encuentren realmente a la misma altura, es decir, que  $Y_1$  sea igual a  $Y_2$ . Si no es así, se realiza la corrección de la distancia entre los dos puntos aplicando el Teorema de Pitágoras para así poder obtener la distancia real en *pixel*. Una vez obtenido este valor, se mide la distancia en *milímetros* de estos dos puntos en la cuadrícula y se divide la distancia real en *pixel* entre ésta, consiguiendo así la relación *pixel/mm*.

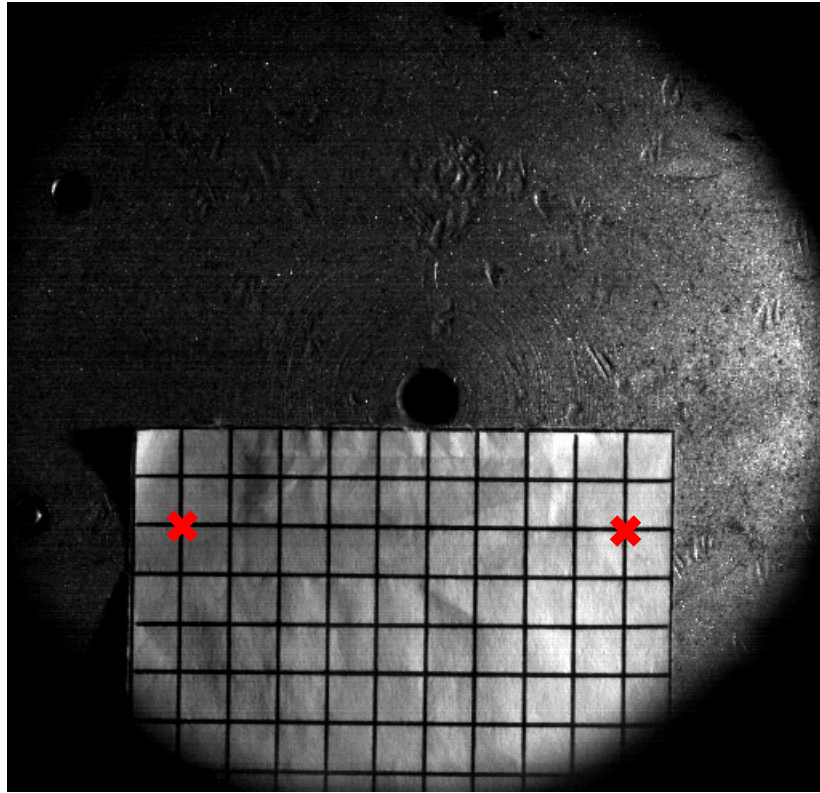


Figura 3.5: Obtención de la relación *pixel/mm*.

En este caso la relación obtenida es de  $4.3832 \text{ pixel/mm}$ , y la resolución de las imágenes y el tiempo de exposición que se utilizó fue de  $512 \times 512 \text{ píxeles}$  y  $197 \mu\text{s}$ , respectivamente.

### 3.2.2 PROCESAMIENTO DE IMÁGENES

Las imágenes adquiridas durante el ensayo, son almacenadas en la estación de adquisición de vídeo y analizadas mediante un código propio, desarrollado en el software MATLAB<sup>®</sup>, con el cual se determinan los parámetros macroscópicos del chorro líquido.

Dicho algoritmo fue desarrollado en el Grupo de Investigación en Energía Térmica y Renovable, diseñado por el Ing. Guillermo Rubio Gómez, puesto en prácti-

ca y validado en la tesis de maestría del Mc. Luis Fernando Rúa Mojica [96]. Además, en esta tesis de maestría se puede encontrar descrito a grandes rasgo el tratamiento realizado a cada imagen. En la Figura 3.6 se muestran los contornos de los chorros diésel detectados por el código en una imagen a la cual se le ha realizado el tratamiento.

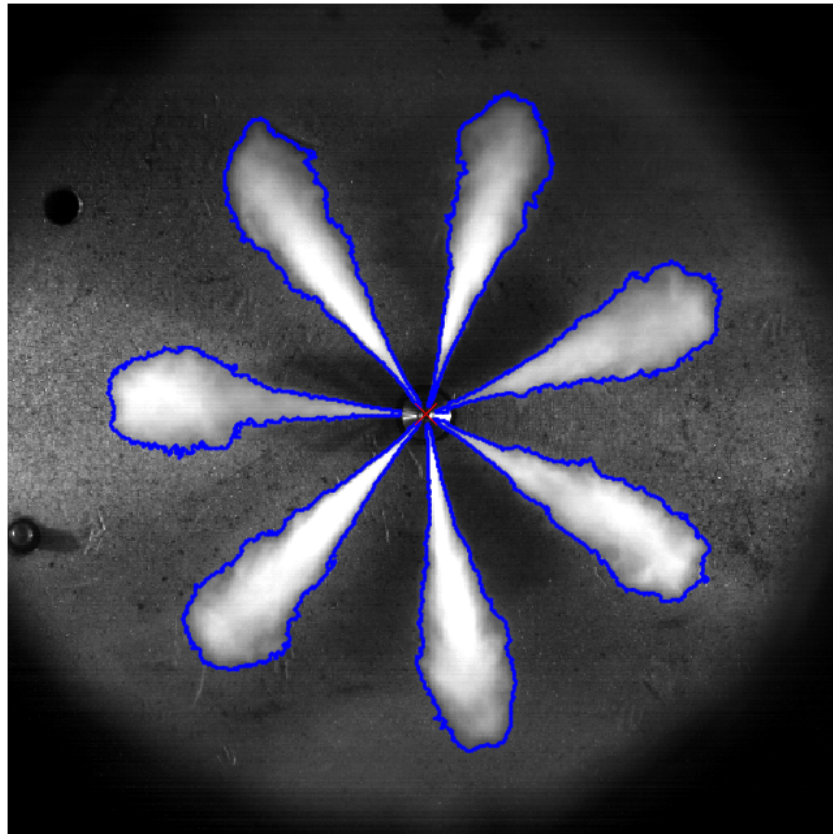


Figura 3.6: Muestra del procesamiento de imágenes.

### **Evaluación de la calidad de medición del software**

Todas las medidas experimentales vienen afectadas de un imprecisión inherente al proceso de medida, y a la hora de expresar el resultado de una medición de una magnitud física, es obligado dar alguna indicación cuantitativa de la calidad del resultado, de forma que quienes utilizan dicho resultado puedan evaluar su idoneidad. Sin dicha indicación, las mediciones no pueden compararse entre sí, ni con otros valores de referencia dados en especificaciones o normas. Por ello es neces-

rio establecer un procedimiento fácilmente comprensible y aceptado universalmente para caracterizar la calidad del resultado de una medición; esto es, para evaluar y expresar su **incertidumbre**. La incertidumbre puede ser expresada de dos formas:

- Incertidumbre de la medida.

$$X = V_{med} \pm \varepsilon_{abs} = V_{med} \pm |V_{med} - V_{real}| \quad (3.1)$$

- Incertidumbre relativa.

$$\delta = \frac{\varepsilon_{abs}}{V_{med}} \cdot 100 = \frac{|V_{med} - V_{real}|}{V_{med}} \cdot 100 \quad (3.2)$$

donde  $V_{med}$  es el valor medido con un instrumento físico,  $V_{real}$  es el valor real y  $\varepsilon_{abs}$  es el error absoluto de la medida [99].

Para determina la incertidumbre de medida que se está teniendo con el software de procesamiento de imágenes, se procedió a realizar una simulación del proceso de inyección en la maqueta de visualización a volumen constante. Para ello, se ubicaron tres chorros de papel blanco, de los cuales se conocen sus dimensiones, en el interior de la cámara a volumen constante y alrededor del hueco del inyector, como se muestra en la Figura 3.7. Por último, se tomaron varias fotos y se realizó el procesamiento de cada una de ellas.

Tabla 3.2: Incertidumbres obtenidas en la simulación del proceso de inyección.

| Parámetros macroscópicos          | Número de chorro | Valor real | Valor medido | Incertidumbre de la medida | Incertidumbre relativa (%) |
|-----------------------------------|------------------|------------|--------------|----------------------------|----------------------------|
| Penetración del chorro (mm)       | 1                | 35.0       | 35.3         | $35.3 \pm 0.3$             | 0.85                       |
|                                   | 2                | 50.3       | 50.3         | $50.3 \pm 0.0$             | 0.00                       |
|                                   | 3                | 46.0       | 45.9         | $45.9 \pm 0.1$             | 0.22                       |
| Ángulo de apertura del chorro (°) | 1                | 34.3       | 34.0         | $34.0 \pm 0.3$             | 0.88                       |
|                                   | 2                | 17.0       | 16.9         | $16.9 \pm 0.1$             | 0.59                       |
|                                   | 3                | 29.0       | 29.0         | $29.0 \pm 0.0$             | 0.00                       |

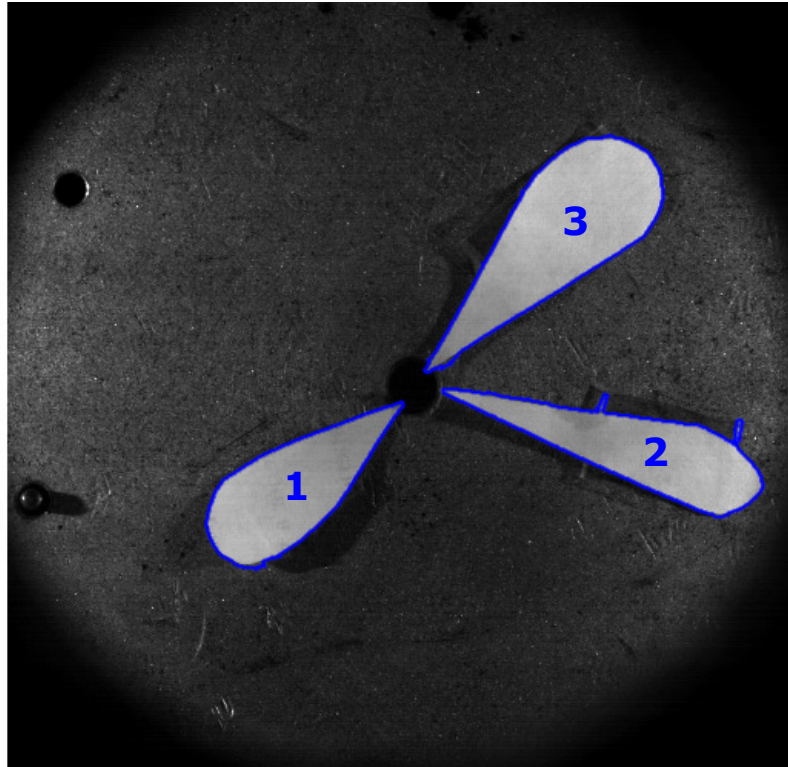


Figura 3.7: Simulación del proceso de inyección para la obtención de la incertidumbre de medida.

Los resultados de esta prueba para la evaluación de la incertidumbre de medida se muestran en la Tabla 3.2, donde se observa que la incertidumbre que se está teniendo con el software de procesamiento de imágenes es irrelevante ya que la incertidumbre relativa obtenida es menor al 1 %.

### 3.3 MÉTODO DE DESTILACIÓN A PRESIÓN ATMOSFÉRICA

La norma ASTM D86 – 04 [92], *Método de prueba estándar para la destilación de productos del petróleo a presión atmosférica*, es un método de estudio sistemático, analítico, descriptivo y sencillo para conseguir determinar algunas de las propiedades necesarias de las mezclas [100].

El método de destilación de la norma ASTM D86 – 04 consiste en destilar 100 ml de combustible, este proceso se realiza en una unidad de destilación discontinua de laboratorio a presión ambiente, (Figura 3.8). Ésta consta de un matraz de destilación engler de 100 ml (1), un condensador recto de 70 cm de largo (2), un termómetro de mercurio con un rango de temperatura de 0 °C a 410 °C (3), una probeta de 100 ml (4) y una mantilla con control de temperatura con un rango de temperatura de 0 °C a 450 °C (5). El termómetro se ha de colocar como se muestra en la Figura 3.8, el bulbo del termómetro debe de estar centrado en el cuello del matraz y el extremo inferior del capilar de éste debe estar nivelado con el punto más alto de la parte inferior de la pared interior del tubo de vapor.

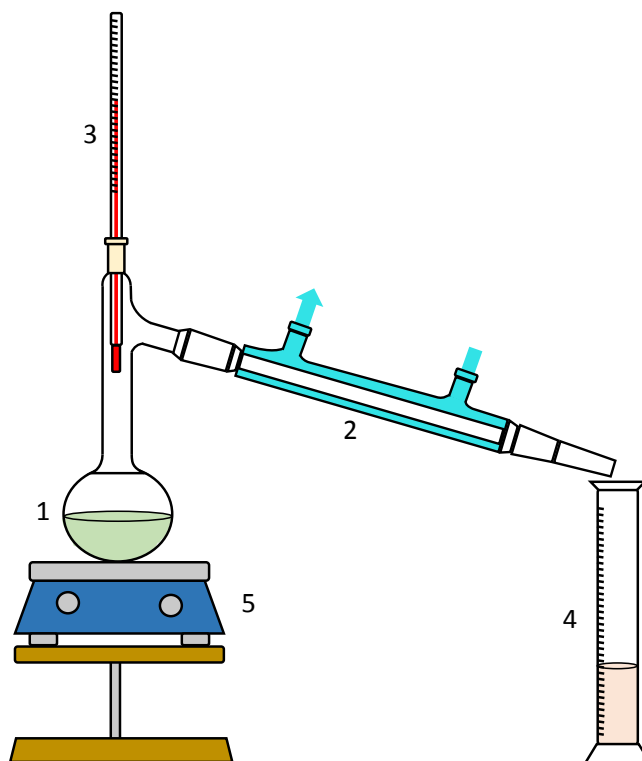


Figura 3.8: Unidad de destilación discontinua de laboratorio a presión ambiente utilizada.

Se realizan observaciones sistemáticas de lectura de temperatura y volumen de condensado, dependiendo de las necesidades del usuario. Los resultados obtenidos se expresan normalmente como porcentaje de volumen recuperado ( $V$ ) frente a la

temperatura ( $T$ ) correspondiente, ya sea en forma de tabla o gráficamente, como un gráfico de la curva de destilación. El punto inicial de ebullición (*Initial Boiling Point*, IBP) se toma en el instante en que la primera gota de condensado cae desde el extremo inferior del tubo del condensador, y el punto final de ebullición (*End Boiling Point*, EBP) se toma cuando se ha evaporado gran parte del líquido contenido en el matraz (por encima del 95 %). Finalmente, se anota el porcentaje total de volumen recuperado ( $V_{TR}$ ) y el porcentaje de volumen de residuo ( $V_R$ ). Por lo que, el porcentaje de volumen perdido ( $V_P$ ) será:

$$V_P = 100 - V_{TR} - V_R \quad (3.3)$$

A estos datos obtenidos, se les debe realizar una corrección en función de la presión barométrica de la prueba y las pérdidas. Mediante la correlación de Sydney Young [101] se realiza la corrección de la lectura de temperatura a una presión de 101.3  $kPa$  y se obtienen cada una de las lecturas de temperaturas corregidas:

$$T_C = T + 0.0009 \cdot (101.3 - P) \cdot (273 + T) \quad (3.4)$$

donde  $T_C$  es la lectura de temperatura corregida en  $^{\circ}C$ ,  $T$  es la lectura de temperatura observada en  $^{\circ}C$  y  $P$  es la presión barométrica que prevalece durante la prueba en  $kPa$ , este dato se toma con la ayuda de un manómetro de laboratorio.

A continuación, se realiza la corrección al volumen recuperado. Para ello, primero se determina el porcentaje de volumen perdido corregido ( $V_{PC}$ ) a una presión de 101.3  $kPa$ :

$$V_{PC} = 0.5 + \frac{V_P - 0.5}{1 + [(101.3 - P)/8]} \quad (3.5)$$

y por último, se obtiene el porcentaje de volumen recuperado corregido ( $V_C$ ) para cada porcentaje de volumen recuperado:

$$V_C = V + (V_P - V_{PC}) \quad (3.6)$$

Por ende, el porcentaje total de volumen recuperado corregido ( $V_{TRC}$ ) será:

$$V_{TRC} = V_{TR} + (V_P - V_{PC}) \quad (3.7)$$

y el porcentaje evaporado ( $V_E$ ) será:

$$V_E = V_C + V_{PC} = V + V_P \quad (3.8)$$

### 3.4 MÉTODO DE OBTENCIÓN DE GRAVEDAD ESPECÍFICA

La norma ASTM D1298 – 99 [91], *Método de prueba estándar para densidad, densidad relativa (gravedad específica) o gravedad API de petróleo crudo y productos de petróleo líquido por el método del hidrómetro*, es un método por el cual se determina, mediante un hidrómetro (densímetro), la densidad, gravedad específica o gravedad API del petróleo crudo, productos derivados del petróleo o mezcla de productos petrolíferos y no petrolíferos que se manejan normalmente como líquidos, y que tiene una presión de vapor Reid de 101.325 *kPa* o menos.

Para determinar la gravedad específica de una muestra, ésta y la probeta que la contiene debe de estar a la misma temperatura. El hidrómetro de gravedad específica 60/60 °F, también a una temperatura similar, se introduce dentro de la probeta que contiene la muestra y se deja asentar. Una vez que se asienta y se alcanza el equilibrio térmico, se lee la escala del hidrómetro, como se muestra en la Figura 3.9, y se toma la temperatura de la muestra con un termómetro. Si la temperatura observada es



distinta a la temperatura de referencia del hidrómetro,  $60\text{ }^{\circ}\text{F}$  o  $15.56\text{ }^{\circ}\text{C}$ , se corrige la lectura de la gravedad específica mediante la siguiente ecuación:

$$GE_R = \frac{GE_T}{1 - [23 \cdot 10^{-6} \cdot (T - R) - 2 \cdot 10^{-8} \cdot (T - R)^2]} \quad (3.9)$$

donde  $GE_R$  es la lectura de la gravedad específica a la temperatura de referencia ( $R$ ) en  $^{\circ}\text{C}$  y  $GE_T$  es la lectura de la gravedad específica a la temperatura observada ( $T$ ) en  $^{\circ}\text{C}$ .

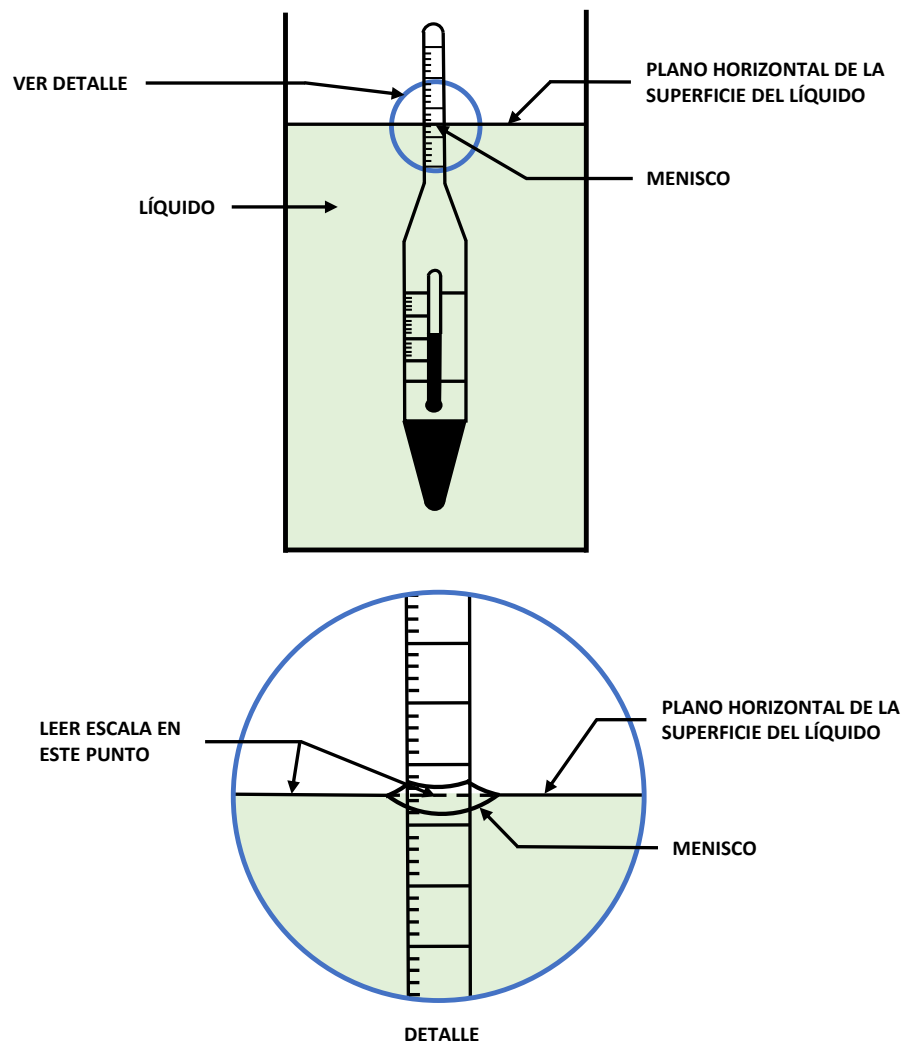


Figura 3.9: Lectura escala hidrómetro.

---

El hidrómetro de gravedad específica  $60/60\text{ }^{\circ}F$  debe ser de vidrio graduado en unidades de gravedad específica conforme a la especificación E 100 o ISO 649 – 1. El diámetro interior de la probeta cilíndrica debe ser al menos  $25\text{ mm}$  mayor que el diámetro exterior del hidrómetro y la altura debe ser tal que el hidrómetro flote con un espacio mínimo de  $25\text{ mm}$  entre la parte inferior del hidrómetro y la parte inferior de la probeta.

## CAPÍTULO 4

# METODOLOGÍA

---

*En este capítulo se expone la metodología empleada en la realización de este estudio. En primer lugar, se expone la definición y elaboración de las mezclas ternarias de objeto de estudio. En segundo lugar la realización de los estudios de estabilidad de las mezclas antes definidas, y después a este estudio, la obtención de la curva de destilación y la gravedad específica de cada combustible. Posteriormente, el cálculo del índice de cetano, la densidad, la viscosidad y la tensión superficial de éstos. Después la delimitación del número de combustibles a inyectar. A continuación, el diseño de la matriz de experimento y la realización de la experimentación. Por último, el procesamiento de las imágenes.*

## 4.1 DEFINICIÓN Y ELABORACIÓN DE LAS MEZCLAS

El biodiésel utilizado para la realización de las mezclas se obtuvo a partir de aceite usado de cocina, se eligió éste por su viabilidad de adquisición y bajo costo de la materia prima. En la Tabla 4.1 se muestra la proporción de ésteres metílicos de ácidos grasos del biodiésel, ésta se determinó mediante cromatografía de gases (Apéndice A).

Tabla 4.1: Composición química del biodiésel de aceite usado de cocina por cromatografía de gases.

| Ésteres metílicos de ácidos grasos | Proporción (%) |
|------------------------------------|----------------|
| C16:0 (Ácido palmítico)            | 19.83          |
| C18:1 (Ácido oleico)               | 56.26          |
| C18:2 (Ácido linoleico)            | 18.25          |
| C20:0 (Ácido araquídico)           | 5.66           |

El combustible diésel utilizado para la realización de las mezclas es de uso comercial en Estados Unidos, se eligió éste por tener un índice de cetano mayor que el del diésel de uso comercial en México. Y el etanol elegido es de tipo anhidro y sus características son las que se muestran en la Tabla 4.2 [24, 102].

Tabla 4.2: Especificaciones etanol anhidro.

| Parámetros                  | Especificaciones | Unidades           |
|-----------------------------|------------------|--------------------|
| Pureza mínima (C.G.)        | 99.80            | %                  |
| Densidad a 15 °C            | 792.00           | kg/m <sup>3</sup>  |
| Viscosidad c. a 40 °C       | 1.13             | mm <sup>2</sup> /s |
| Tensión superficial a 25 °C | 21.97            | mN/m               |
| Número de cetano            | 5-8              | -                  |

Con base a la literatura y al interés por reducir al máximo el uso de combustible diésel, la relación de mezclas ternarias que se elaboraron y estudiaron son las que

se muestran en la Tabla 4.3. El porcentaje de etanol que se utilizó en las mezclas fue del 5, 10 % y 20 %, y el del biodiésel fue de 10, 20, 30 y 40 %. No se utilizó un porcentaje mayor de etanol y de biodiésel en la elaboración de las mezclas, debido a que se preveía un gran alejamiento de los valores de las propiedades de la mezcla con respecto a las del combustible diésel debido a las propiedades de éstos, como se vio en la Sección 1.2.

Tabla 4.3: Relación de mezclas ternarias elaboradas.

| Mezcla         | % Vol. Diésel | % Vol. Biodiésel | % Vol. Etanol |
|----------------|---------------|------------------|---------------|
| <b>DB10E5</b>  | 85            | 10               | 5             |
| <b>DB20E5</b>  | 75            | 20               | 5             |
| <b>DB30E5</b>  | 65            | 30               | 5             |
| <b>DB40E5</b>  | 55            | 40               | 5             |
| <b>DB10E10</b> | 80            | 10               | 10            |
| <b>DB20E10</b> | 70            | 20               | 10            |
| <b>DB30E10</b> | 60            | 30               | 10            |
| <b>DB40E10</b> | 50            | 40               | 10            |
| <b>DB10E20</b> | 70            | 10               | 20            |
| <b>DB20E20</b> | 60            | 20               | 20            |
| <b>DB30E20</b> | 50            | 30               | 20            |
| <b>DB40E20</b> | 40            | 40               | 20            |

Las mezclas se prepararon sobre una base de volumen a 22 °C (temperatura ambiente del laboratorio), aunque la preparación de las mezclas sobre una base en peso tiene la ventaja de que la fracción en peso no cambia con la temperatura. Pero en la industria del combustible, el proceso de mezclado es llevado a cabo sobre una base de volumen a la temperatura ambiente de la ubicación de la planta de producción [103]. Por esta razón, la opción seleccionada para este estudio fue utilizar las reglas de mezclas en función de las fracciones volumétricas.

## 4.2 ESTUDIO DE ESTABILIDAD DE LAS MEZCLAS

Uno de los objetivos principales de usar este tipo de mezclas de combustible en los motores diésel es realizar las mínimas modificaciones posibles al motor. Una solución es un sistema líquido monofásico, homogéneo a nivel molecular.

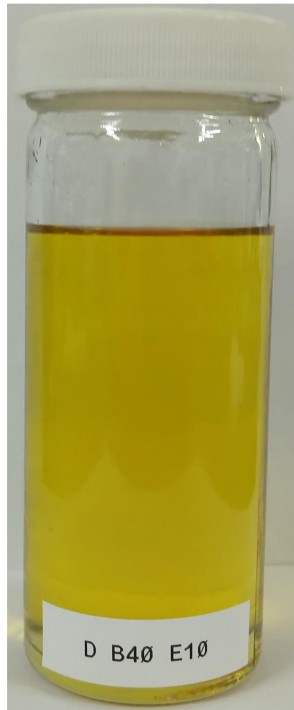
Park et al. [35] realizaron un estudio de la estabilidad y del efecto de mantener las mezclas de diésel-biodiésel-etanol en un recipiente cerrado o abierto sobre la separación de fases. Observaron que en el caso de dejar el recipiente abierto, la separación de fase de la mezcla ocurría inmediatamente después de realizar la mezcla y la relación de separación aumentaba a medida que transcurría el tiempo. Y en el caso de dejar éste cerrado, la separación de fases ocurría entre las 24 y 48 horas después de realizar la mezcla para algunas combinaciones de porcentajes de biodiésel y de etanol. Por lo que, concluyeron que estas mezclas son combustibles suficientemente estables para ser utilizados en motores diésel siempre y cuando éstas se encuentren almacenadas herméticamente.

Por todo lo anterior, resultó de interés para este trabajo realizar un estudio de estabilidad de las mezclas, que se muestran en la Tabla 4.3, a una temperatura de 22 °C (temperatura ambiente del laboratorio), cerradas herméticamente y durante 4 días (96 horas). En la Figura 4.1 se muestra una mezcla la cual no ha sufrido el fenómeno de la separación de fases (a y b) y otra que sí ha sufrido este fenómeno (c y d). Además, en esta última se aprecia un enturbiamiento de la mezcla, es decir, tiene un color más amarillento.

La relación de separación de fases se calculó a partir de la relación entre el volumen de la capa superior separada y el volumen inicial de etanol:

$$sf = \frac{\% Vol. Capa superior}{\% Vol. Inicial etanol} \quad (4.1)$$

En la Figura 4.2 se muestra la relación de separación de fases de la mezcla según



(a) DB40E10 0 horas



(b) DB40E10 96 horas



(c) DB10E20 0 horas



(d) DB10E20 96 horas

Figura 4.1: Fotos de los fenómenos de separación de fases de las mezclas.

la proporción de biodiésel para una proporción fija del 5% de etanol en función del tiempo transcurrido desde que se realizó ésta, en la Figura 4.3 y en la Figura 4.4 se muestra lo mismo pero para una proporción fija del 10% de etanol y del 20% de etanol.

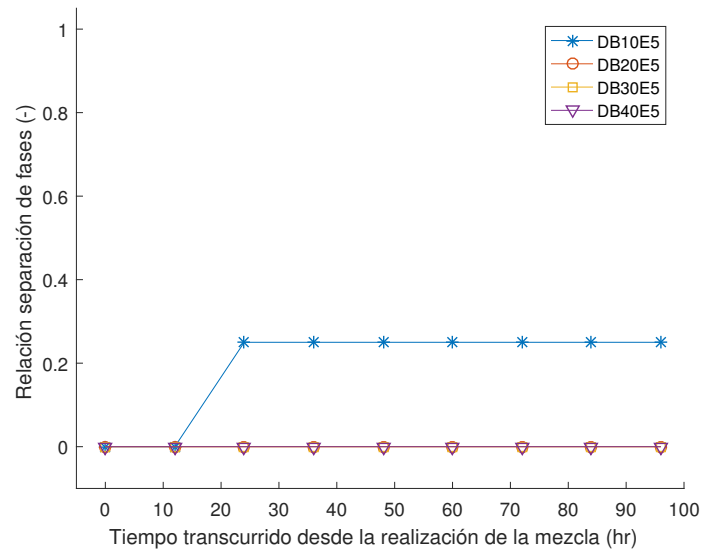


Figura 4.2: Relación de separación de fases de la mezcla según la proporción de biodiésel para una proporción fija del 5% de etanol.

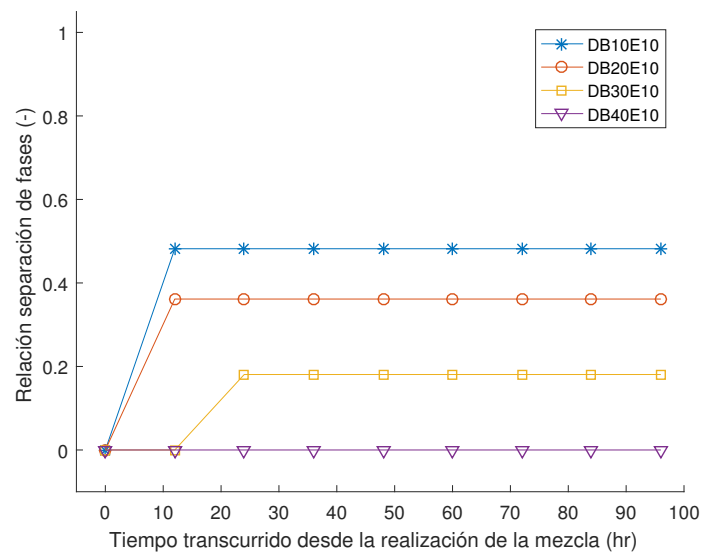


Figura 4.3: Relación de separación de fases de la mezcla según la proporción de biodiésel para una proporción fija del 10% de etanol.



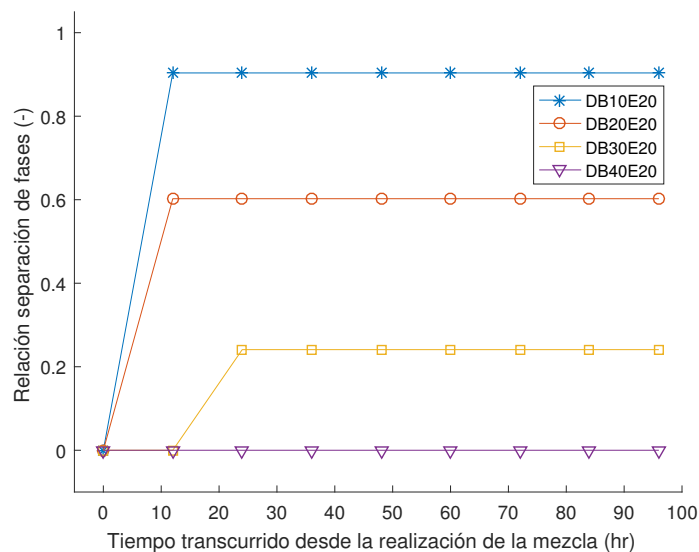


Figura 4.4: Relación de separación de fases de la mezcla según la proporción de biodiésel para una proporción fija del 20% de etanol.

Se observa en la Figura 4.2, en la Figura 4.3 y en la Figura 4.4 que cuanto mayor es el porcentaje de biodiésel con respecto al porcentaje de etanol en la mezcla, mejor es la estabilidad de la mezcla.

### 4.3 OBTENCIÓN DE LAS CURVAS DE DESTILACIÓN ASTM D86-04

Todas las mezclas, que se muestran en la Tabla 4.3, y el diésel (D100), el biodiésel (B100) y el etanol (E100) se han destilado siguiendo el procedimiento establecido por la norma ASTM D86 – 04, detallada en la Sección 3.3.

Se han registrado los puntos inicial (*IBP*) y final (*EBP*) de ebullición, las temperaturas de destilación para los múltiplos porcentuales de 5, el volumen total recuperado (% Vol. Total recuperado), el volumen de residuo (% Vol. Residuo) que se encontraba en el matraz y la presión barométrica que prevaleció durante el proceso

de destilación. También se realizaron las correcciones a las temperaturas observadas mediante la Ecuación 3.4 y se calculó el volumen de pérdidas (% Vol. Pérdidas) por medio de la Ecuación 3.3.

Todos los datos de las curvas de destilación que se muestran en la Figura 4.5, en la Figura 4.6, en la Figura 4.7 y en la Figura 4.8 se encuentran en el Apéndice B.

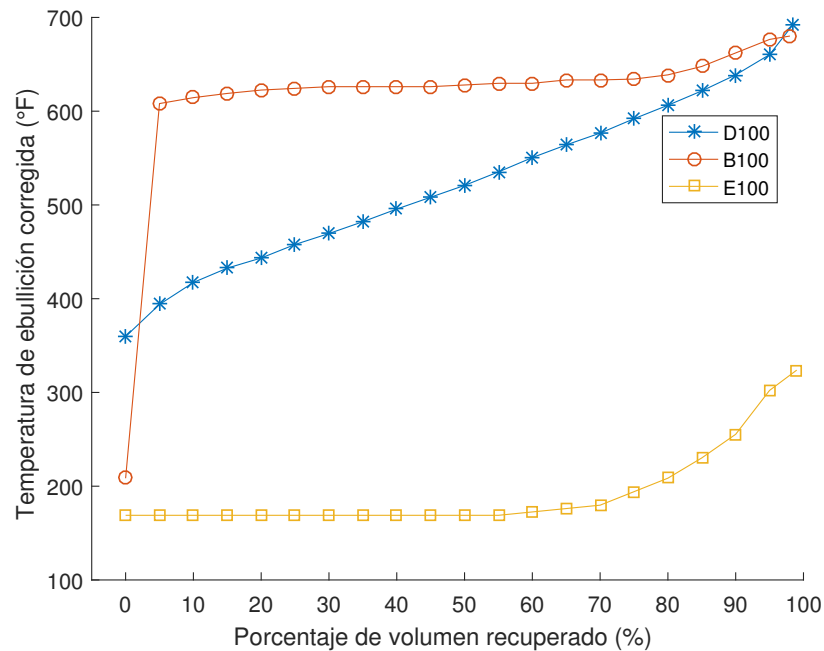


Figura 4.5: Curvas de destilación ASTM D86-04 de los combustibles puros.

Comparando la Figura 4.6, la Figura 4.7 y la Figura 4.8 con la Figura 4.5 se puede determinar:

- El primer componente que se destila de cada una de las mezclas es el etanol, esto es debido a su baja temperatura de ebullición.
- Cuanto mayor es la proporción de biodiésel en la mezcla mayores son las temperatura de destilación de ésta, siguen la tendencia de la curva del biodiésel.
- Las curvas de destilación de todas las mezclas tiene un punto final de ebullición (*EBP*) comprendido entre 658 y 662 °F, esto es consecuencia al *EBP* del diésel y del biodiésel.

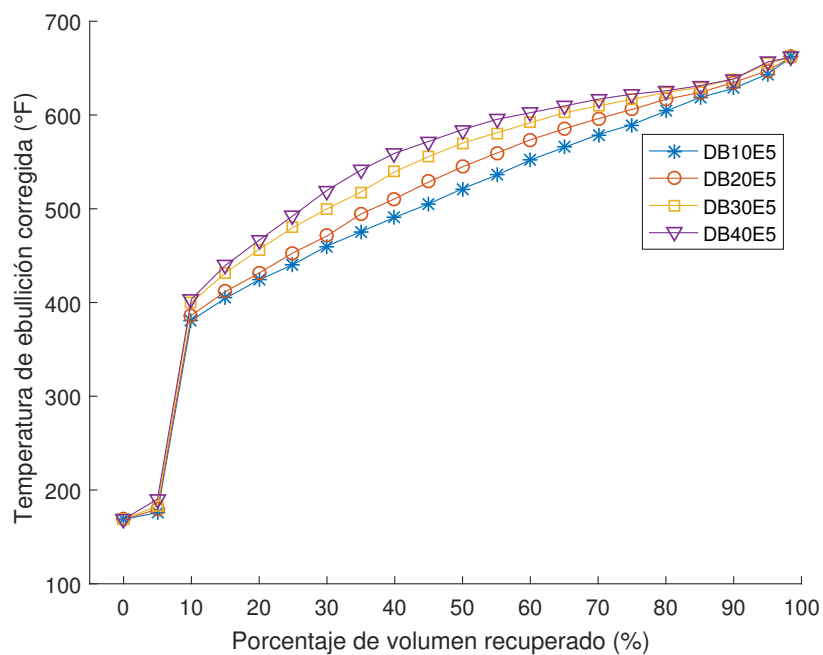


Figura 4.6: Curvas de destilación ASTM D86-04 de las mezclas con una porción fija del 5% de etanol.

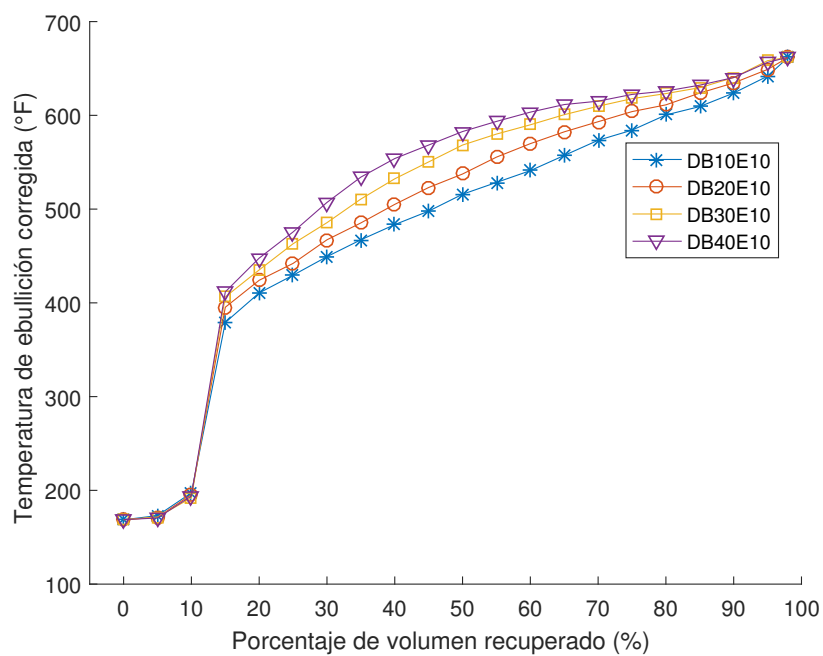


Figura 4.7: Curvas de destilación ASTM D86-04 de las mezclas con una porción fija del 10% de etanol.

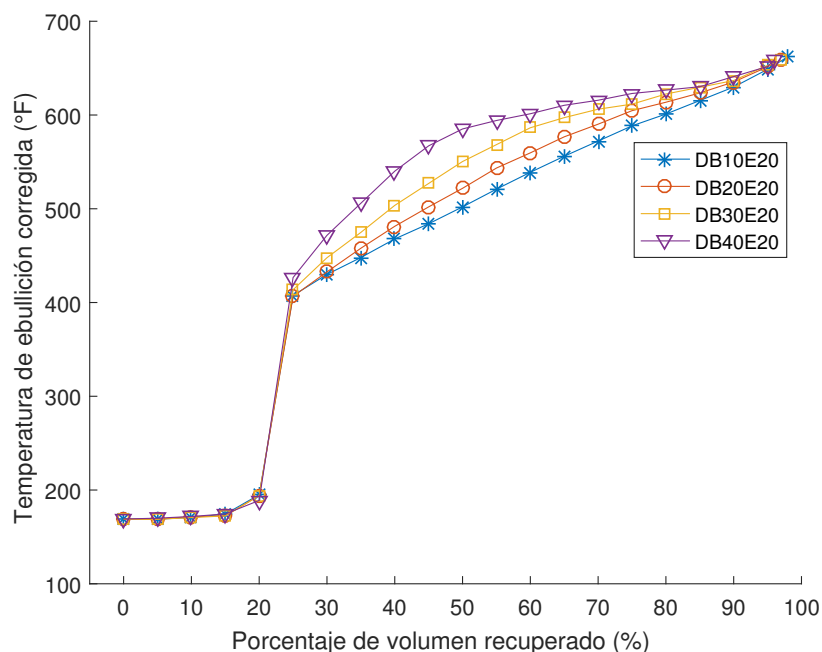


Figura 4.8: Curvas de destilación ASTM D86-04 de las mezclas con una porción fija del 20 % de etanol.

#### 4.4 OBTENCIÓN DE LA GRAVEDAD ESPECÍFICA DE LOS COMBUSTIBLES

La gravedad específica  $60/60^{\circ}F$  de todas las mezclas, que se observan en la Tabla 4.3, y del diésel (D100) y del biodiésel (B100) se han obtenido siguiendo el procedimiento establecido por la norma ASTM D1298 – 99, descrita en la Sección 3.4.

Se llenó una probeta con 250 ml de combustible o mezcla y se midió la gravedad específica, con un densímetro normalizado EEUU ASTM E100 con un rango de 0.800–0.850, y la temperatura. En la Tabla 4.4 se muestran estos datos y su posterior corrección mediante la Ecuación 3.7.

Tabla 4.4: Gravedad específica de los combustibles.

| Combustible | Observado   |                  | Corregido   |
|-------------|-------------|------------------|-------------|
|             | GE 60/60 °F | Temperatura (°C) | GE 60/60 °F |
| D100        | 0.8225      | 23.0             | 0.8226      |
| B100        | 0.8830      | 24.5             | 0.8832      |
| DB10E5      | 0.8225      | 23.0             | 0.8226      |
| DB20E5      | 0.8320      | 23.0             | 0.8321      |
| DB30E5      | 0.8385      | 23.0             | 0.8386      |
| DB40E5      | 0.8455      | 22.5             | 0.8456      |
| DB10E10     | 0.8225      | 25.0             | 0.8227      |
| DB20E10     | 0.8310      | 22.0             | 0.8311      |
| DB30E10     | 0.8390      | 22.0             | 0.8391      |
| DB40E10     | 0.8455      | 22.0             | 0.8456      |
| DB10E20     | 0.8225      | 22.0             | 0.8226      |
| DB20E20     | 0.8280      | 22.0             | 0.8281      |
| DB30E20     | 0.8345      | 22.0             | 0.8346      |
| DB40E20     | 0.8385      | 24.0             | 0.8387      |

## 4.5 CÁLCULO DE LAS PROPIEDADES DE LOS COMBUSTIBLES

Es importante conocer las propiedades de los combustibles debido a que son datos de entrada requeridos para conocer como se van a comportar éstos en el proceso de mezcla y de combustión, como se vio en la Sección 1.2. Además, es necesario saber si el combustible resultante del proceso de mezcla cumple con las especificaciones estándar para los combustibles diésel. Por lo que, se realizó el cálculo de las propiedades de los combustibles con las ecuaciones que se enumeraron en la Sección 2.3. En la Tabla 4.5 se muestra la densidad a  $\approx 15\text{ }^{\circ}\text{C}$ , la viscosidad a  $\approx 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ , la tensión superficial a  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  y el índice de cetano de los combustibles.

Tabla 4.5: Propiedades calculadas de los combustibles.

| Combustible    | $\rho_{15}$<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | $\nu_{40}$<br>(mm <sup>2</sup> /s) | $\sigma_{25}$<br>(mN/m) | IC    |
|----------------|-------------------------------------|------------------------------------|-------------------------|-------|
| <b>D100</b>    | 821.83                              | 2.68                               | 27.84                   | 59.32 |
| <b>B100</b>    | 882.31                              | 7.91                               | 28.65                   | 55.48 |
| <b>DB10E5</b>  | 821.83                              | 2.48                               | 27.71                   | 57.90 |
| <b>DB20E5</b>  | 831.32                              | 2.77                               | 27.81                   | 56.31 |
| <b>DB30E5</b>  | 837.82                              | 3.18                               | 27.97                   | 56.27 |
| <b>DB40E5</b>  | 844.80                              | 3.47                               | 28.03                   | 54.22 |
| <b>DB10E10</b> | 821.87                              | 1.70                               | 26.98                   | 55.33 |
| <b>DB20E10</b> | 830.30                              | 1.86                               | 27.03                   | 53.93 |
| <b>DB30E10</b> | 838.30                              | 2.04                               | 27.15                   | 53.31 |
| <b>DB40E10</b> | 844.79                              | 2.19                               | 27.24                   | 51.34 |
| <b>DB10E20</b> | 821.81                              | 1.55                               | 26.65                   | 50.19 |
| <b>DB20E20</b> | 827.31                              | 1.65                               | 26.76                   | 49.17 |
| <b>DB30E20</b> | 833.80                              | 1.79                               | 26.90                   | 47.38 |
| <b>DB40E20</b> | 837.84                              | 1.96                               | 27.08                   | 45.58 |

## 4.6 EVALUACIÓN DE LAS MEZCLAS

Se procedió a la evaluación de las mezclas con base al estudio de estabilidad y a las propiedades de los combustible. Estas propiedades se compararon con la norma EN 590 : 2014 [104], *Combustibles para automoción - Diésel - Requisitos y métodos de ensayo*, debido a que es más restrictiva que la norma americana ASTM D975–98b [105], *Especificaciones estándar para el combustible diésel*, véase Tabla 4.6. Por lo que, en la comparativa se obtuvo que las mezclas DB10E5, DB20E5, DB30E5, DB40E5, DB30E10 y DB40E10 fueron las que cumplieron con las restricciones de la norma EN 590 : 2014.

Tabla 4.6: Especificaciones técnicas seleccionadas en las normas EN590 : 2014 y ASTM D975.

| Especificación                       | Unidades                | ASTM D975 |     | EN 590 |     |
|--------------------------------------|-------------------------|-----------|-----|--------|-----|
|                                      |                         | Límite    |     | Límite |     |
|                                      |                         | Mín       | Máx | Mín    | Máx |
| <b>Índice de cetano</b>              |                         | 40        |     | 46     |     |
| <b>Viscosidad cinemática a 40 °C</b> | <b>mm<sup>2</sup>/s</b> | 1.9       | 4.1 | 2.0    | 4.5 |
| <b>Densidad a 15 °C</b>              | <b>kg/m<sup>3</sup></b> |           |     | 820    | 845 |

Por otro lado, el estudio de estabilidad determinó que las mezclas DB20E5, DB30E5, DB40E5, DB40E510 y DB40E20 se mantuvieron estables desde la realización de la mezcla. Las mezclas DB10E5, DB30E10 y DB30E20 sufrieron una separación de fase después de las 12 primeras horas, mientras que las mezclas B10E10, DB20E10, DB10E20 y DB20E20 fue entre las primeras 12 horas. Por lo que, estas cuatro últimas mezclas no se pueden utilizar en la experimentación debido a que nada más mezclarse ocurre la separación de fase.

Puesto que con este estudio se pretende determinar la influencia de las propiedades de los combustibles en el proceso de mezcla, y además utilizar la mayor porción de biocombustible posible. Las mezclas que se eligieron para la experimentación fueron tres, una con las propiedades muy cercanas a las del diésel y las otras dos que estuvieran las propiedades en los extremos. Estas tres mezclas no sufren una separación de fase nada más realizarse la mezcla y además, cumplen la norma EN 590 : 2014, véase Tabla 4.7.

## 4.7 DISEÑO DE LA MATRIZ DE EXPERIMENTOS

Después de evaluar las mezclas y determinar cuales son las más adecuadas para la realización del estudio, se determinaron las condiciones de operación del sistema.

Tabla 4.7: Mezclas elegidas para la experimentación.

| Combustible    | $\rho_{15}$<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | $\nu_{40}$<br>(mm <sup>2</sup> /s) | $\sigma_{25}$<br>(mN/m) | IC    |
|----------------|-------------------------------------|------------------------------------|-------------------------|-------|
| <b>DB20E5</b>  | 831.32                              | 2.77                               | 27.81                   | 56.31 |
| <b>DB40E5</b>  | 844.80                              | 3.47                               | 28.03                   | 54.22 |
| <b>DB30E10</b> | 838.30                              | 2.04                               | 27.15                   | 53.31 |

Para ello se determinaron los valores de los parámetros de *presión ambiente*, *presión de inyección* y *duración de la inyección*. Estos valores se determinaron con base a los valores más habituales que se pueden encontrar en un sistema de inyección diésel actualmente, los cuales se muestran en la Tabla 4.8 [106], y a las limitaciones de la instalación experimental.

Tabla 4.8: Condiciones de operación habituales en un sistema de inyección diésel.

|   |             |
|---|-------------|
| <b>Presión de inyección (bar)</b>                         | 1000 - 1500 |
| <b>Presión ambiente en condiciones no reactivas (bar)</b> | 50 - 80     |
| <b>Duración de la inyección (<math>\mu</math>s)</b>       | 1000 - 2000 |

La instalación experimental permite alcanzar una presión de inyección máxima de 1300 *bar*, como ya se indicó en la Sección 3.1.2, una presión ambiente de hasta 60 *bar* y una duración de la inyección de hasta 1500  $\mu$ s. La presión ambiente está limitada por motivos de seguridad y la duración de la inyección para evitar que el chorro de combustible desaparezca del enfoque de la cámara antes de que el inyector se cierre, y el número de eventos está restringido a 3 para prevenir que se ensucien los accesos ópticos [95].

Por lo tanto, se eligió una duración de la inyección de 1500  $\mu$ s, un número de eventos de 3 y dos presiones de inyección de 1000 y 1300 *bar*. La presión ambiente elegida fue de 60 *bar* debido a que ésta se encuentra entre los parámetros de operación habituales. Además, con esta presión se evita también que el chorro desaparezca del



enfoque de la cámara rápidamente y disminuye el avance del chorro, permitiendo así obtener un mayor número de imágenes del proceso de inyección. En consecuencia, se determinó la siguiente matriz de experimentos que se muestra en la Tabla 4.9.

Tabla 4.9: Matriz de experimentos.

| <b>Combustible</b>                            | <b>D100</b> |          | <b>DB20E5</b> |          | <b>DB40E5</b> |          | <b>DB30E10</b> |          |
|---|-------------|----------|---------------|----------|---------------|----------|----------------|----------|
| <b>Experimento</b>                            | <b>1</b>    | <b>2</b> | <b>1</b>      | <b>2</b> | <b>1</b>      | <b>2</b> | <b>1</b>       | <b>2</b> |
| <b>Número de eventos</b>                      | 3           | 3        | 3             | 3        | 3             | 3        | 3              | 3        |
| <b>P. de inyección (bar)</b>                  | 1000        | 1300     | 1000          | 1300     | 1000          | 1300     | 1000           | 1300     |
| <b>P. ambiente (bar)</b>                      | 60          | 60       | 60            | 60       | 60            | 60       | 60             | 60       |
| <b>D. de la inyección (<math>\mu</math>s)</b> | 1500        | 1500     | 1500          | 1500     | 1500          | 1500     | 1500           | 1500     |

En este estudio se decidió no inyectar el biodiésel puro (B100) por miedo a que pudiera obstruir el inyector u ocasionar algún problema al sistema de inyección. Por lo tanto, las mezclas sólo se evaluaron frente al comportamiento del chorro diésel.

## 4.8 EXPERIMENTACIÓN Y PROCESAMIENTO DE LAS IMÁGENES

Una vez determinada la matriz de experimentos se procedió a la experimentación. Se inyectaron los combustibles en la maqueta de visualización a volumen constante, instalación experimental descrita en la Sección 3.1, y se modificaron las condiciones de operación como se determinó en la Sección 4.7.

Para evitar que se separe el etanol de la mezcla y se evapore debido a su baja temperatura de ebullición ( $76^{\circ}C$ ), se monitoreo la temperatura del combustible en el depósito y en el retorno del inyector. En la Tabla 4.10 se muestran las temperaturas que se tuvieron en los dos punto durante la experimentación. La cámara a volumen constante se presurizó con nitrógeno 100% puro y la temperatura que se mantuvo

dentro de ésta fue de  $24^{\circ}\text{C}$  durante todos los experimentos.

Tabla 4.10: Temperatura del combustible durante la experimentación.

| <b>Combustible</b>  | <b>D100</b> |          | <b>DB20E5</b> |          | <b>DB40E5</b> |          | <b>DB30E10</b> |          |
|---|-------------|----------|---------------|----------|---------------|----------|----------------|----------|
| <b>Experimento</b>  | <b>1</b>    | <b>2</b> | <b>1</b>      | <b>2</b> | <b>1</b>      | <b>2</b> | <b>1</b>       | <b>2</b> |
| <b>Temperatura retorno (<math>^{\circ}\text{C}</math>)</b>  | 39.3        | 44.2     | 35.9          | 36.8     | 43.3          | 43.8     | 43.2           | 46.3     |
| <b>Temperatura depósito (<math>^{\circ}\text{C}</math>)</b> | 30.8        | 32.2     | 26.6          | 31.5     | 35.6          | 37.8     | 38.8           | 40.7     |

Después de realizar la experimentación se analizó el comportamiento de los parámetros macroscópicos, penetración y ángulo de apertura del chorro, de cada uno de los combustibles objeto de estudio. Para ello se tomaron imágenes del proceso de inyección utilizando la técnica óptica descrita en la Sección 3.2 y se realizó el procesamiento de éstas mediante el software descrito en la Sección 3.2.2.

## CAPÍTULO 5

# RESULTADOS

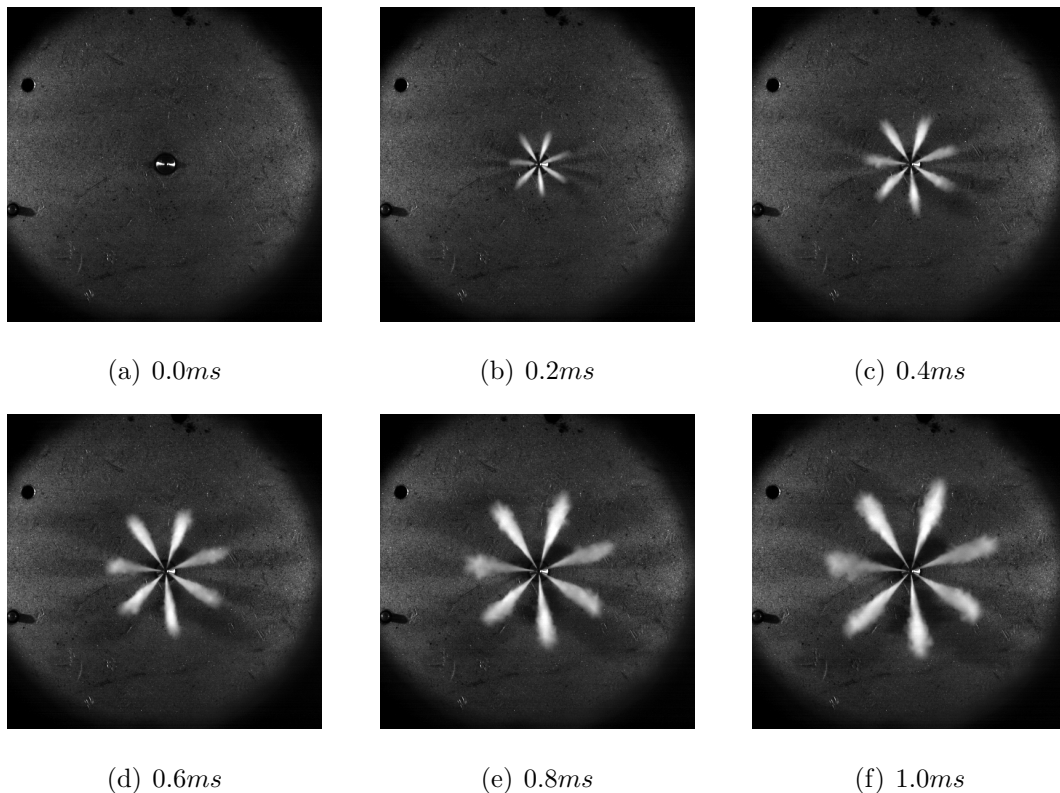
---

*En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en la experimentación. En primer lugar, se mostrarán las imágenes tomadas durante el proceso de inyección y los resultados obtenidos con el software de procesamiento de imágenes. A continuación, se exponen los efectos de las propiedades de las mezclas en la penetración del chorro. Por último, se analiza el efecto de éstas en el ángulo de apertura del chorro.*

## 5.1 IMÁGENES ADQUIRIDAS EN EL PROCESO DE INYECCIÓN

En primer lugar, se muestran las imágenes adquiridas durante el proceso de inyección mediante la técnica óptica de iluminación directa por dispersión MIE, técnica descrita en la Sección 3.2.

En la Figura 5.1 se muestra una secuencia de imágenes adquiridas en el proceso de inyección del diésel, que corresponden a una presión de inyección de 1000 *bar*, una presión ambiente de 60 *bar* y una duración del pulso de 1500  $\mu s$ . El pie de cada subfigura corresponde al tiempo en el que se tomó la imagen, desde la energización del inyector. Se observa que las imágenes adquiridas cuentan con una buena iluminación, lo que permite distinguir claramente los contornos y la forma de cada uno de los chorros de combustible con el fondo.



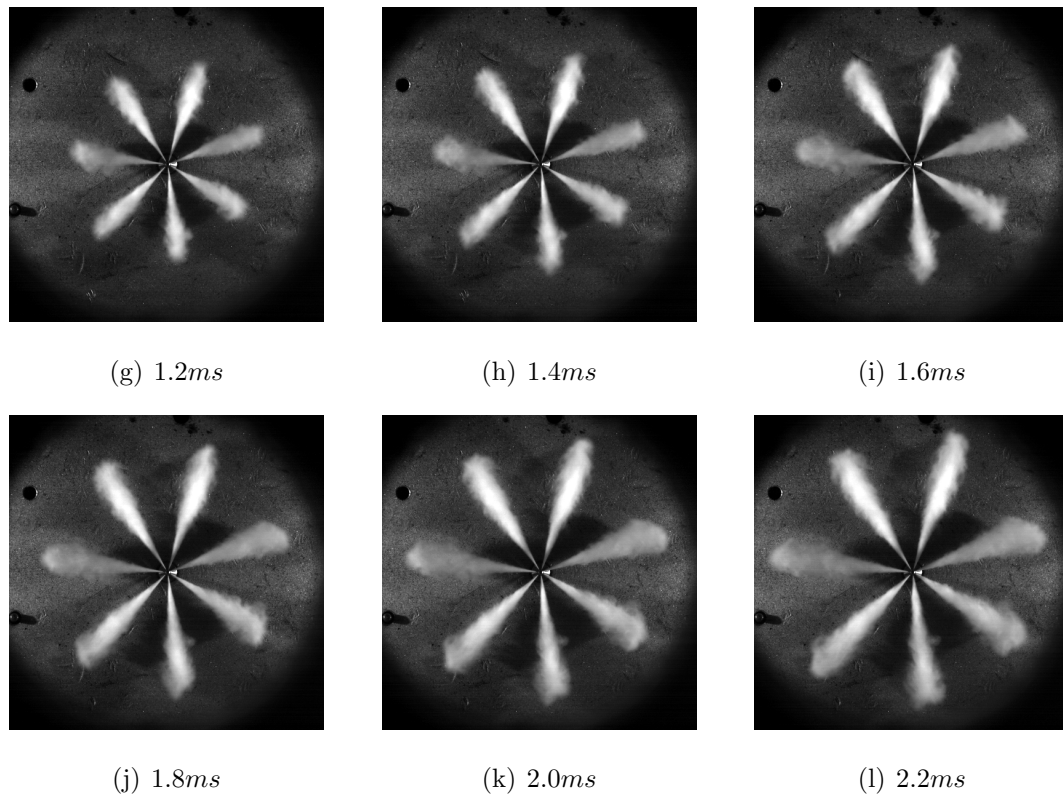


Figura 5.1: Imágenes adquiridas durante el proceso de inyección.

## 5.2 IMÁGENES PROCESADAS CON EL SOFTWARE

Todas las imágenes obtenidas en los tres eventos del proceso de inyección de cada uno de los combustibles son procesadas con el software expuesto en la Sección 3.2.2. Para ello, el software primero obtiene el contorno del chorro, y posteriormente a partir de éste calcula los diferentes parámetros macroscópicos del chorro, como la penetración o el ángulo de apertura de éste, para su posterior análisis.

En la Figura 5.2 se muestra como el software de procesamiento de imágenes detecta perfectamente el contorno de cada uno de los chorros, a excepción de uno. Esto se debe a que está siendo iluminado directamente por la lámpara de halógeno, lo que conlleva que la diferencia de contraste entre el fondo y el chorro sea muy pequeña. Por esto, se decidió no tener en cuenta este chorro para el análisis.

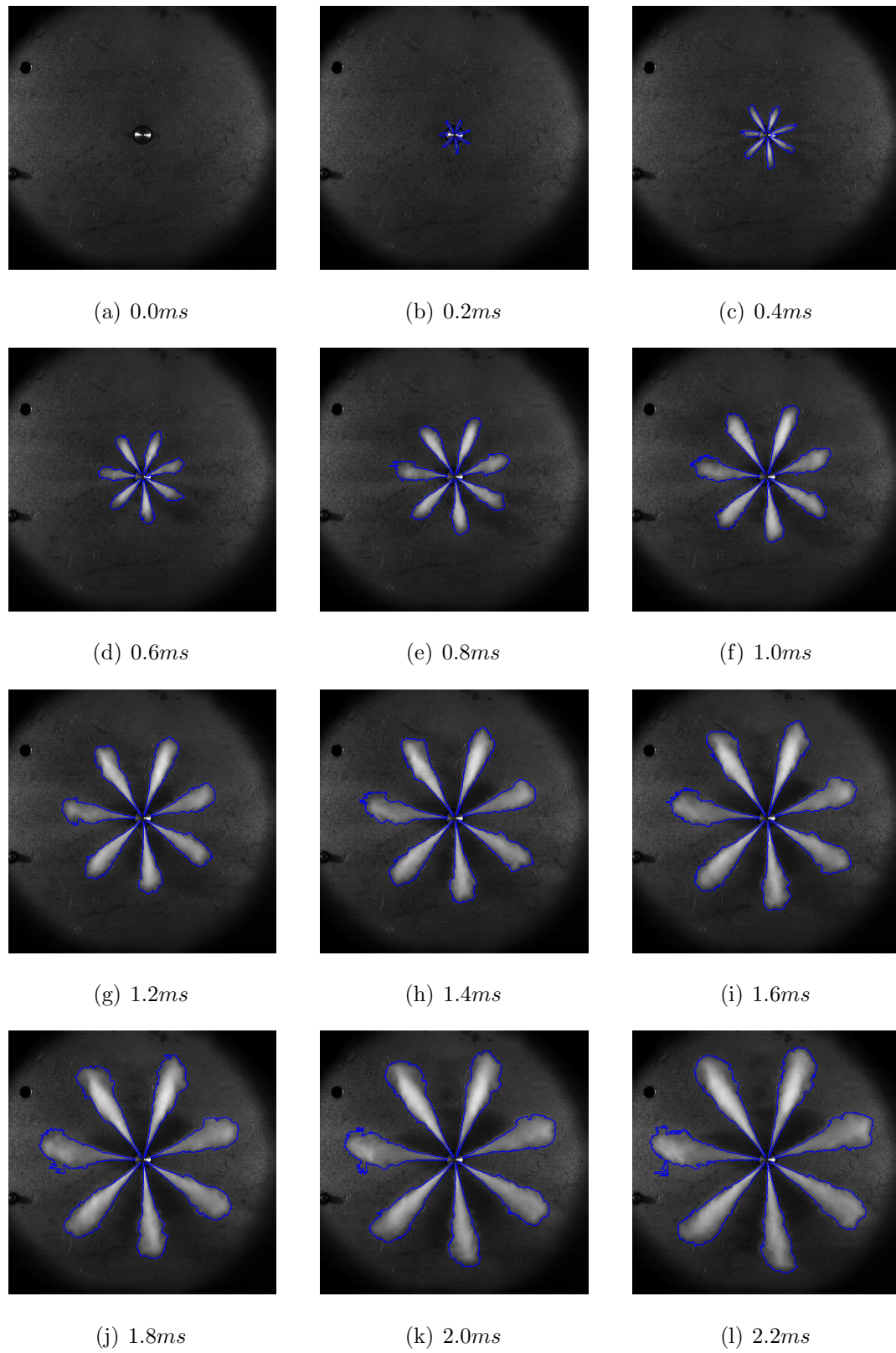


Figura 5.2: Imágenes procesadas del proceso de inyección.

Las imágenes que se exponen en la Figura 5.2 son las del último evento de inyección de los tres eventos del diésel y corresponden a una presión de inyección de 1000 *bar*, una presión ambiente de 60 *bar* y una duración del pulso de 1500  $\mu s$ .

Otro dato que extrae el software de las imágenes es la orientación en la que se encuentra cada uno de los chorros. Éste ubica la orientación  $0^\circ$  en la línea roja que se muestra en la Figura 5.3 y asigna la orientación a cada chorro en sentido antihorario. Por lo tanto, la orientación para cada uno de los chorro es la que se observa en la Tabla 5.1 y el chorro a no tener en cuenta en el análisis es el 4.

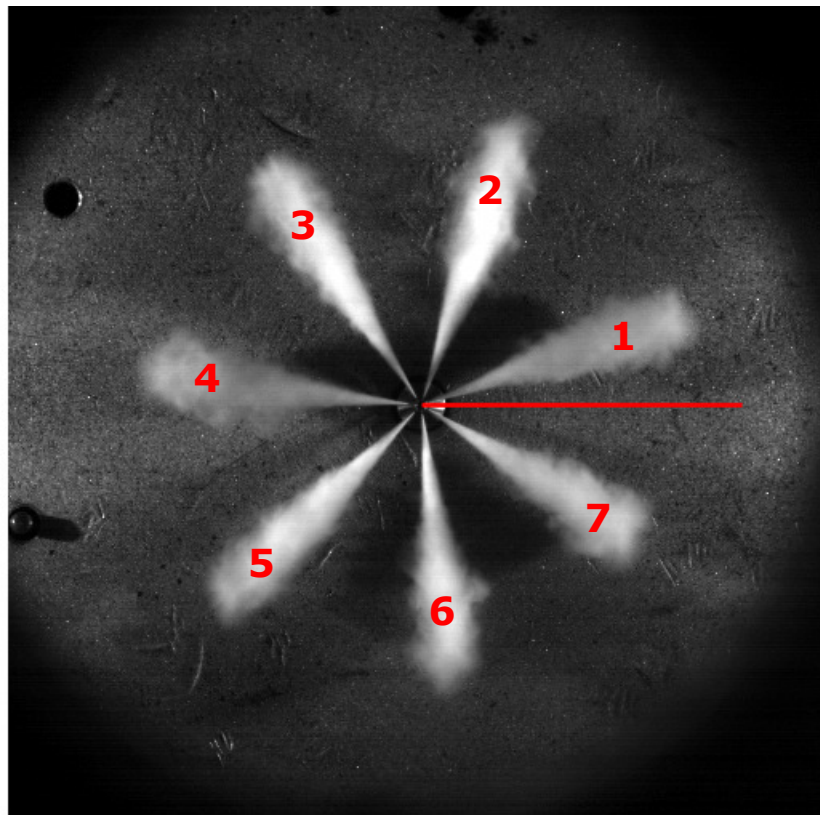


Figura 5.3: Orientación de los chorros.

Tabla 5.1: Orientación de los chorros.

| Número de chorro         | 1    | 2    | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     |
|--------------------------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Orientación ( $^\circ$ ) | 20.5 | 71.8 | 123.3 | 174.3 | 225.8 | 277.7 | 329.4 |

### 5.3 EFECTO DE LAS PROPIEDADES EN LA PENETRACIÓN DEL CHORRO

En la Figura 5.4 y en la Figura 5.5 están representados el total de los resultados de penetración del chorro en función del tiempo transcurrido desde la energización del inyector para las presiones de inyección de 1000 y 1300 *bar*. Las siguientes figuras se han confeccionado mediante el valor promedio de todos los chorros y eventos para cada instante del parámetro estudiado. Además, también se ha representado la desviación típica en cada instante de los datos contenidos en cada una de las gráficas.

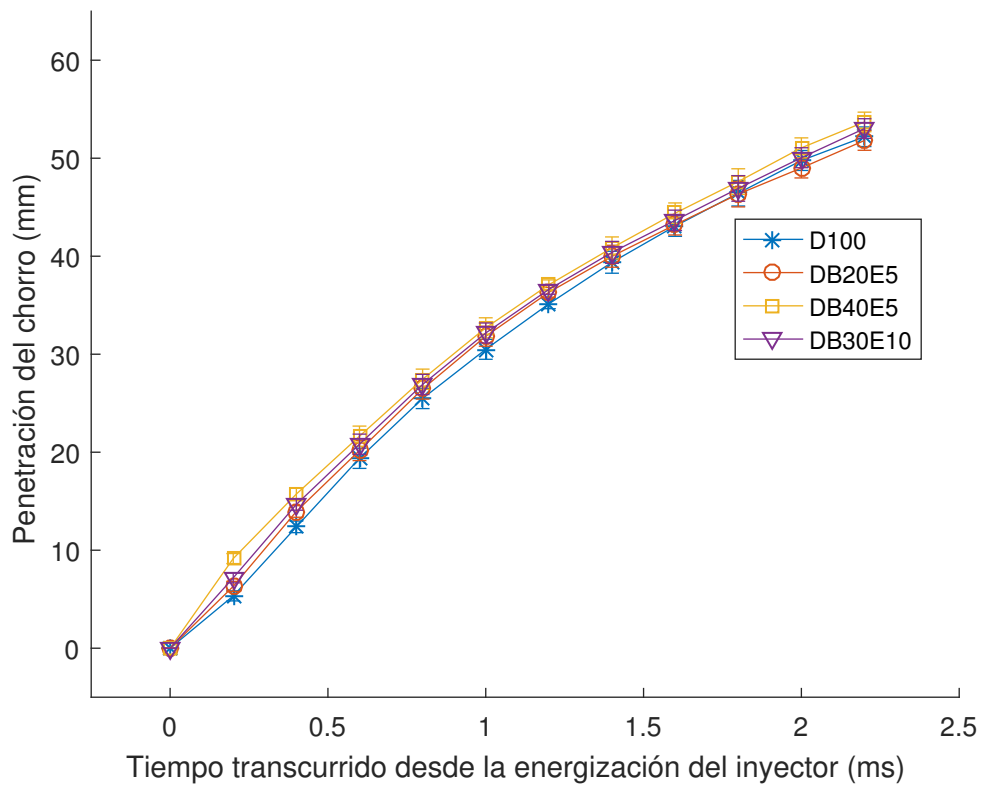


Figura 5.4: Penetración del chorro a una presión de inyección de 1000 *bar*, una presión ambiente de 60 *bar* y una duración de la inyección de 1500  $\mu$  s.

Nótese que en todos los combustibles la penetración del chorro se estabiliza antes con el aumento de la presión de inyección, esto es debido a una mayor velocidad



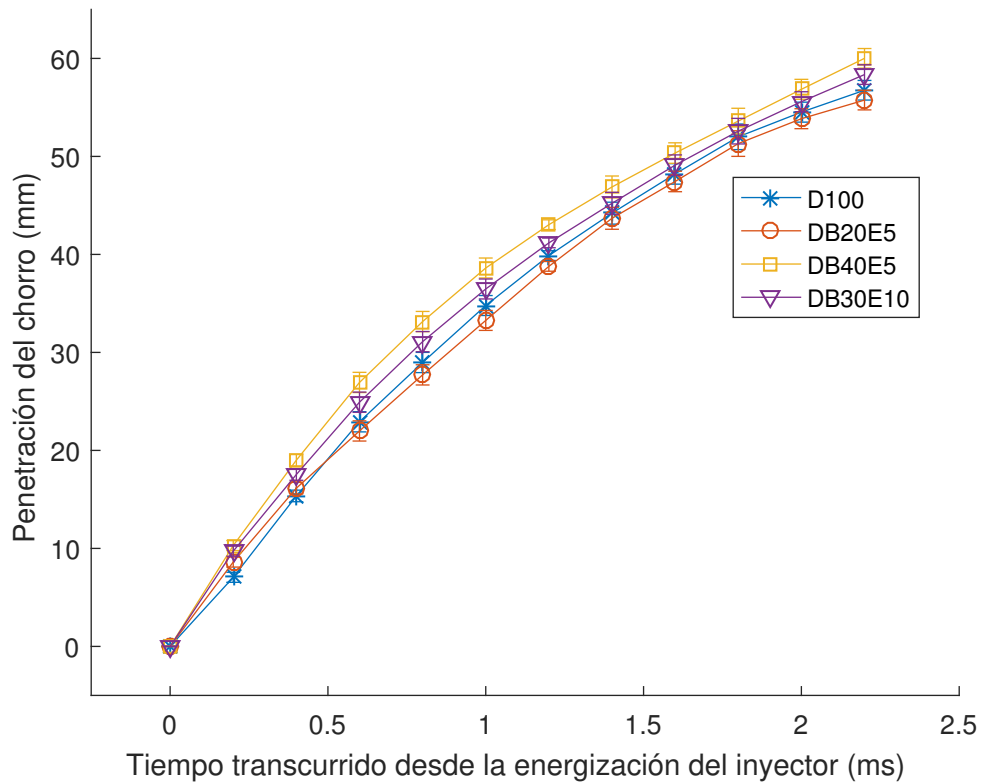


Figura 5.5: Penetración del chorro a una presión de inyección de 1300 bar, una presión ambiente de 60 bar y una duración de la inyección de  $1500 \mu s$ .

de salida como consecuencia de una mayor diferencia entre la presión de inyección y la presión ambiente, véase Ecuación 2.8. Este efecto lleva de forma directa a un aumento de la tasa de inyección generando así una mayor entrega de combustible al sistema, véase Ecuación 2.1 [107]. Esto es coherente con el estudio realizado por Xiangang et al. [108], donde concluyeron que cuanto mayor sea la presión de inyección menor será el tiempo que le tomará a la penetración del chorro estabilizarse.

Es destacable en ambas gráficas que a medida que la densidad del combustible aumenta, Figura 5.6, la penetración de chorro también lo hace. Esto se debe a que cuanto mayor es la densidad del combustible mayor es la tasa de flujo másico, véase Ecuación 2.1, y por ende esto provoca que el chorro ejerza una mayor fuerza sobre el aire circundante y se abra camino con mayor facilidad, dando lugar a una mayor

penetración. Este resultado es consistente con los estudios realizados por Desante et al. [109] y Moon et al. [110], determinaron que la tasa de flujo másico y la velocidad de inyección está influenciada por la densidad del combustible, y que esto conlleva a que una mayor densidad del combustible se tenga una mayor penetración del chorro.

Por otra parte, se observa también que a menor viscosidad y a menor tensión superficial del combustible, Figura 5.7 y Figura 5.8, menor es la penetración del chorro. Esto es debido a una mayor facilidad de deformación y de ruptura de las gotas de combustibles, dando como resultado una disminución de éstas y una pérdida en el impulso de pulverización que eventualmente ralentiza la penetración. Este comportamiento es similar a lo reportado en la literatura por Hiroyasu y Arai [111], Berg et al. [112] y Mo et al. [113].

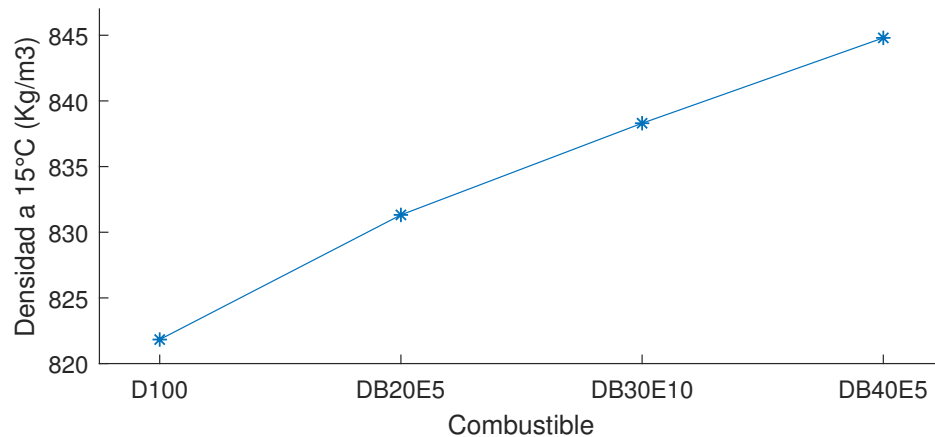


Figura 5.6: Densidad combustibles.

Por último, en la Figura 5.9 se observa que a medida que la presión de inyección disminuye no existe una diferencia marcada entre los valores de penetración de los combustibles, esto es debido a la alta presión ambiente. De esta forma el efecto de la densidad sobre la penetración del chorro tiene menor influencia si la presión ambiente del sistema es elevada y la presión de inyección es baja. Esta conclusión es consistente con el trabajo de Lee et al. [114].

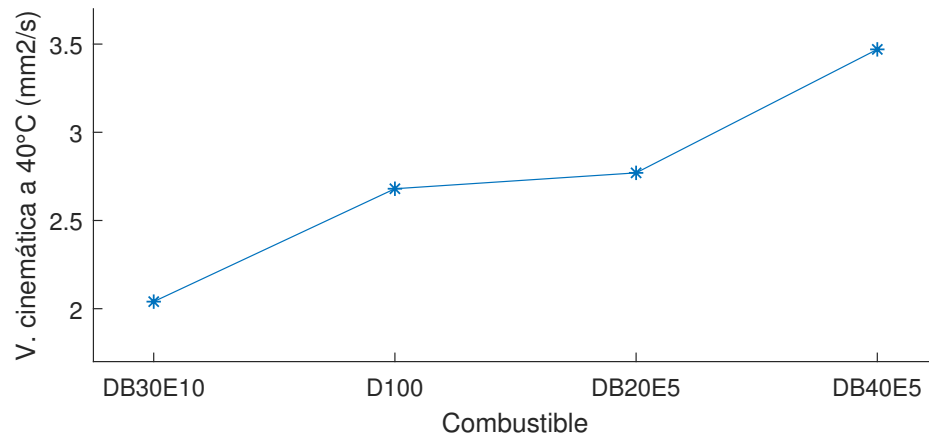


Figura 5.7: Viscosidad cinemática combustibles.

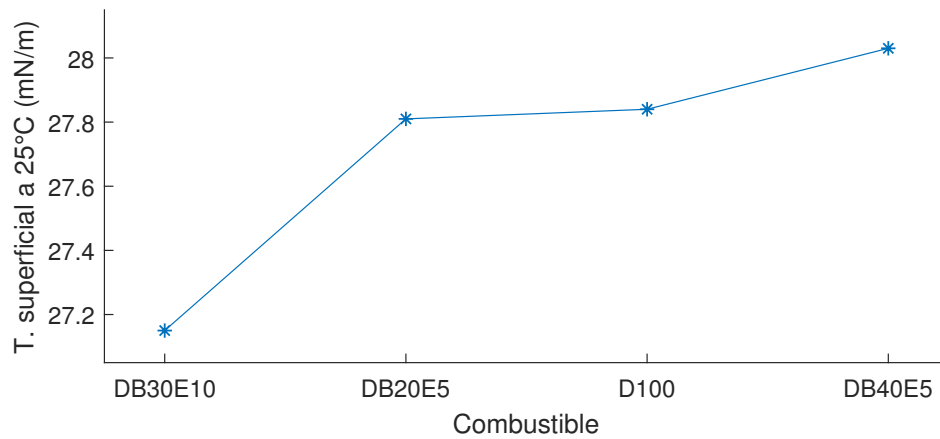


Figura 5.8: Tensión superficial combustibles.

## 5.4 EFECTO DE LAS PROPIEDADES EN EL ÁNGULO DE APERTURA DEL CHORRO

A continuación, se representan los resultados del ángulo de apertura del chorro en función del tiempo transcurrido desde la energización del inyector para las presiones de inyección de 1000 y 1300 *bar*. Al igual que con la penetración del chorro, la Figura 5.10 y la Figura 5.11 han sido elaboradas mediante el valor promedio de todos los chorros y eventos para cada instante del parámetro estudiado. También se

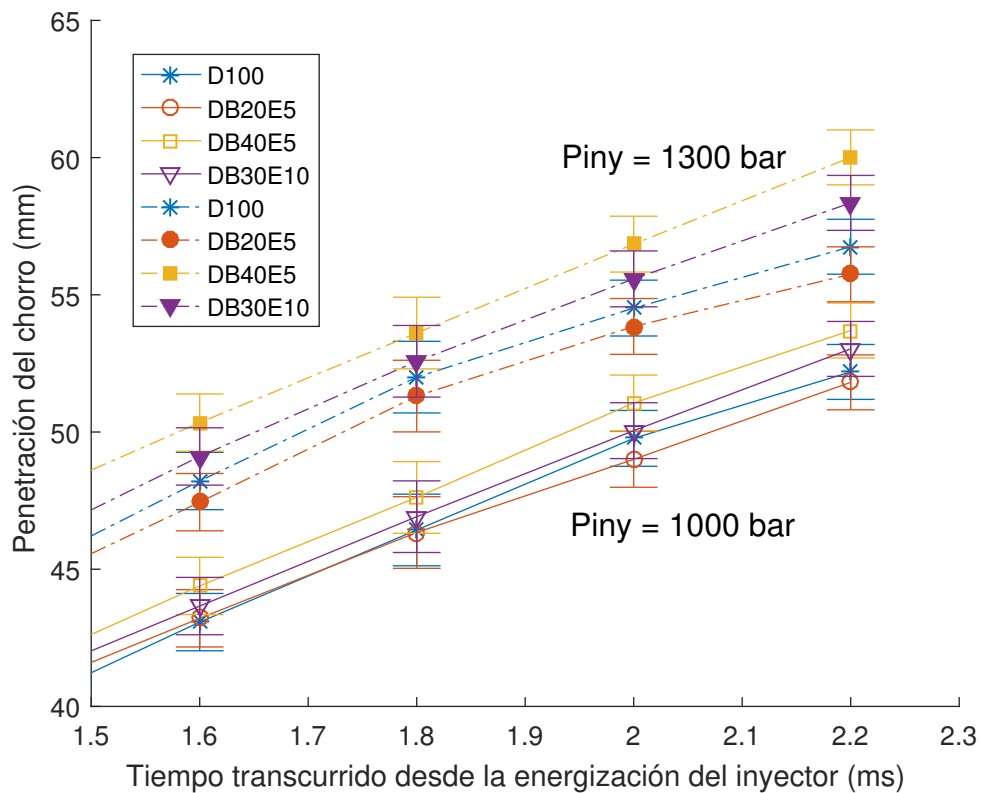


Figura 5.9: Penetración del chorro a dos presiones de inyección de 1000 y 1300 bar, una presión ambiente de 60 bar y una duración de la inyección de  $1500 \mu s$ .

ha representado la desviación típica de cada instante de los datos utilizados en el promedio.

En primera instancia, se observa en cada uno de los combustible que el ángulo de apertura del chorro disminuye ligeramente con el aumento de la presión de inyección. Esto es consecuencia del aumento de la velocidad de salida, que conlleva a que las fuerzas aerodinámicas que experimentan las gotas de combustible sean mayores y den lugar a un vencimiento mayor de sus fuerzas internas [107]. Este mismo efecto de la presión de inyección está reportado en el trabajo de maestría del MC. Omar Torres [95].

Por último, es destacable en ambas gráficas que a medida que disminuye la viscosidad y la tensión superficial del combustible, Figura 5.7 y Figura 5.8, mayor es

el ángulo de apertura del chorro. Esto se debe a un aumento del número de Reynolds, Ecuación 2.3, y del número de Weber, Ecuación 2.4, que promueven la inestabilidad del chorro y da lugar a una mejor atomización del combustible y a una mejor mezcla con los gases circundantes. Este comportamiento es similar a lo reportado en la literatura por Han et al. [115] y Zigan et al. [116].

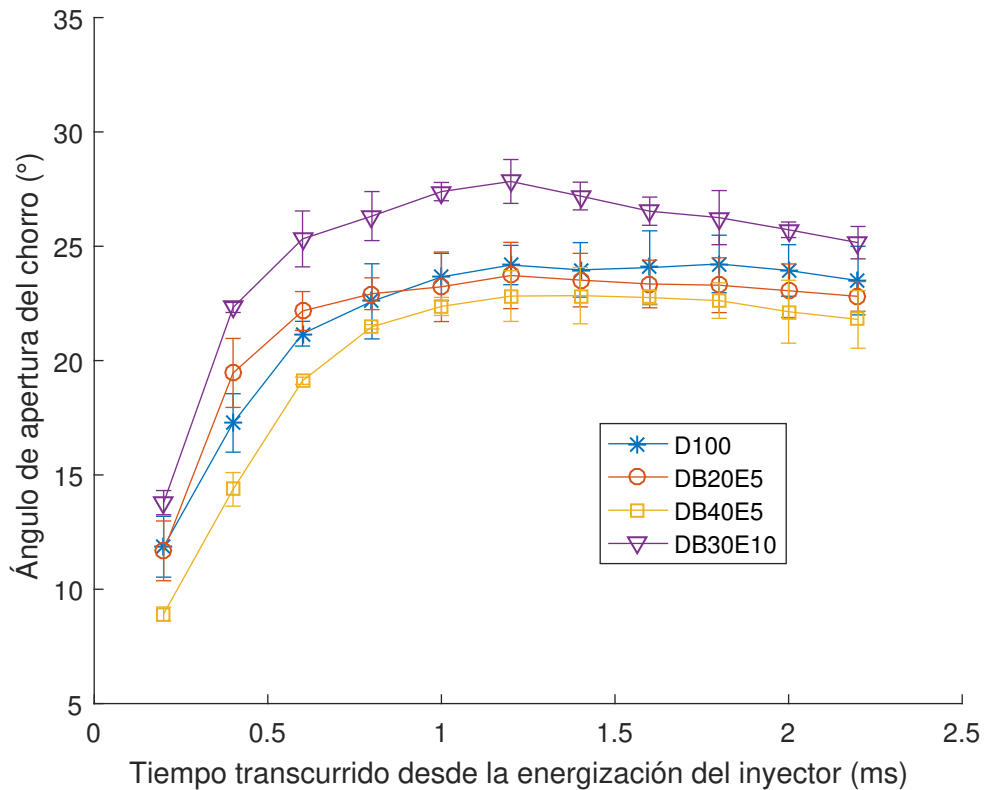


Figura 5.10: Ángulo de apertura del chorro a una presión de inyección de 1000 bar, una presión ambiente de 60 bar y una duración de la inyección de  $1500 \mu s$ .

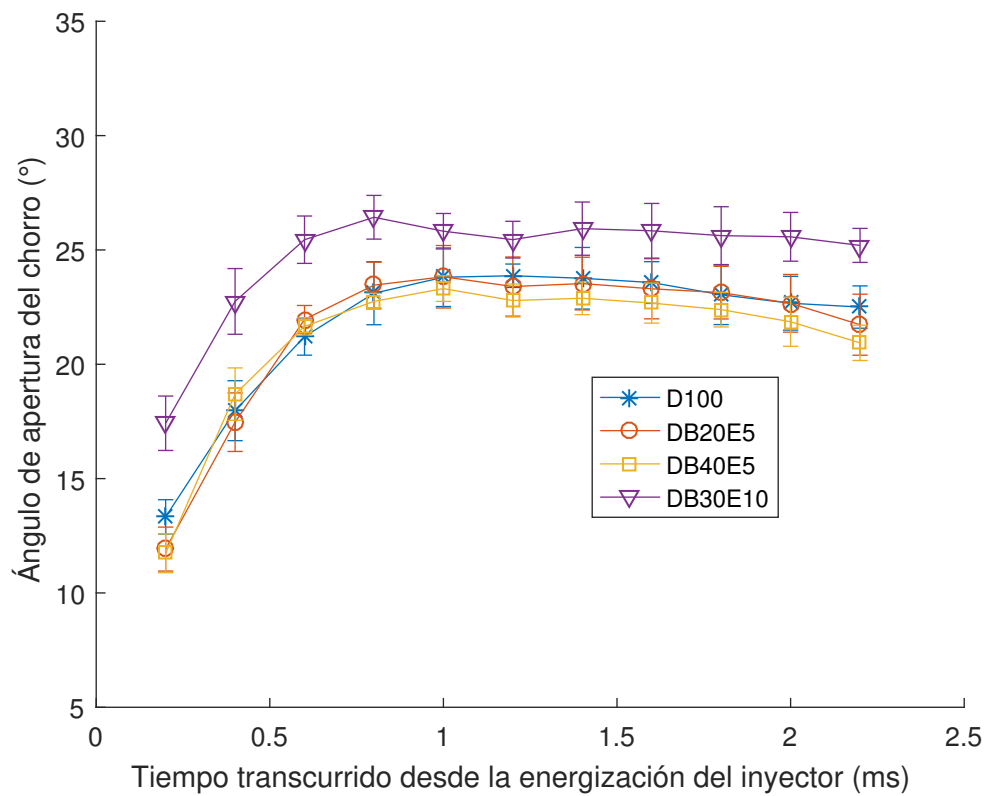


Figura 5.11: Ángulo de apertura del chorro a una presión de inyección de 1300 bar, una presión ambiente de 60 bar y una duración de la inyección de  $1500 \mu s$ .

## CAPÍTULO 6

# CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

---

*En este capítulo se enumeran las conclusiones formuladas con base en los resultados de este trabajo de investigación. Y por último, los trabajos futuros propuesto para la ampliación de este estudio.*

## 6.1 CONCLUSIONES

El propósito de este estudio fue comprender el efecto de las propiedades de mezclas de diésel-biodiésel-etanol en los parámetros macroscópicos del chorro. Por lo tanto, en esta sección se van a sintetizar las principales conclusiones que han sido obtenidas en la realización de este estudio:

- El biodiésel y el etanol son una fuente de energía renovable, que se produce a partir de biomasa (caña de azúcar, desecho forestales, grasas animales, aceites vegetales,...), y se pueden utilizar como sustitutos o en combinación con los combustibles derivados del petróleo. Estos ofrecen frente a los combustibles tradicionales una mayor seguridad energética, una reducción del impacto ambiental y una mejora en el estatus socio-económico relacionado con el sector rural.
- Las mezclas de diésel-biodiésel-etanol son combustibles suficientemente estables para ser utilizados en motores de encendido por compresión siempre y cuando estos se encuentren almacenadas herméticamente y la proporción de biodiésel en la mezcla sea como mínimo cuatro veces mayor que la proporción de etanol.
- El aumento de la proporción de etanol en las mezclas de diésel-biodiésel-etanol indujo a una reducción de la densidad, de la viscosidad cinemática, de la tensión superficial y del índice de cetano de la mezcla. Mientras que un aumento de la proporción de biodiésel lleva a un aumento en estas mismas propiedades, exceptuando el índice de cetano que disminuye.
- La influencia de las propiedades en la penetración del chorro se ve mitigada conforme la presión de inyección disminuye bajo una elevada presión ambiente. Por otra parte, la influencia de éstas en el ángulo de apertura del chorro se ve moderada a medida que la presión de inyección aumenta bajo las mismas condiciones ambiente.



- La penetración del chorro se ve afectada por la densidad del combustible, debido a que cuanto mayor es ésta mayor es la entrega de combustible, y por ende esto ocasiona que el chorro ejerza una mayor fuerza sobre el aire circundante y se abra camino con mayor facilidad, dando lugar a una mayor penetración del chorro. Otras propiedades que afectan a este parámetro son la viscosidad y la tensión superficial. Existe una mayor facilidad de deformación y de ruptura de las gotas de combustible cuanto menor son éstas dos, dando como resultado una pérdida en el impulso de pulverización y ralentizando la penetración del chorro.
- Las propiedades que afectan al ángulo de apertura del chorro son la viscosidad y la tensión superficial del combustible. Se ve un aumento de éste conforme disminuye estas dos propiedades, esto se debe a que el chorro se vuelve más inestable y da lugar a que el combustible se atomice mejor y se forme una mejor mezcla con el aire circundante.
- Finalmente, se puede concluir que cuanto menor es la viscosidad y la tensión superficial del combustible mayor será el ángulo de apertura del chorro, y si además se tiene una mayor densidad mayor es la penetración de éste. Por lo tanto, se obtendrá una mayor superficie de contacto con el aire circundante y el proceso de mezcla será mejor. Además, considerar que cuanto mayor sea el índice de cetano mayor será la calidad del combustible. Cabe destacar en esta conclusión que las propiedades del combustible siempre deben de estar dentro de los rangos permisibles de las normas vigentes de combustibles para automoción. Por último, hay que tener en cuenta que una excesiva penetración, podría ser contraproducente, ya que el chorro podría chocar con las paredes de la cámara de combustión y efectuarse una mala combustión, generando más material particulado.

Por lo tanto, con base a las conclusiones obtenidas se puede decir que la hipótesis planteada al principio de este estudio es verdadera y que la mezcla que mejor se

ha comportado de las estudiadas en cuanto al proceso de mezcla es DB30E10, que es la que tiene menor viscosidad y tensión superficial, y mayor densidad.

## 6.2 TRABAJOS FUTUROS

En el presente trabajo se han estudiado los efectos que conlleva el uso de mezclas de diésel-biodiésel-etanol en el proceso de mezcla de los MEC, empleando una maqueta de visualización a volumen constante y la técnica óptica de iluminación por dispersión MIE. A continuación, se expondrán algunos trabajos futuros que darán continuidad y completarán a la presente investigación:

- Los parámetros microscópicos del chorro también son de suma importancia en el proceso de mezcla. Estos engloba la distribución del diámetro, de la velocidad y de la concentración de las gotas de combustible, y estos pueden ser medidos mediante la técnica óptica de anemometría de fase Doppler (*Phase Doppler Anemometry*, PDA). Por lo que, se puede ampliar este estudio determinando el efecto de las propiedades de mezclas de diésel-biodiésel-etanol en estos parámetros.
- Otro estudio conveniente sería determinar la influencia del uso de mezclas de diésel-biodiésel-etanol en las emisiones y en el rendimiento en los motores de encendido por compresión. Esto se realizaría mediante la combustión de estas mezclas en un motor real, en el cual se puedan determinar los porcentajes de cada uno de los gases que se emiten mediante un analizador de gases y los parámetros de rendimiento del motor.
- Por último, sería de relevancia realizar un estudio de tasa de inyección de mezclas de diésel-biodiésel-etanol en un tasímetro. Para determinar la influencia de las propiedades del combustible en el levantamiento de la aguja del inyector y en el flujo interno de la tobera, y así poder determinar su influencia en el

---

proceso de mezcla y por ende en los parámetros macroscópicos y microscópicos de los chorros.

APÉNDICE A

CROMATOGRAMA BIODIÉSEL DE  
ACEITE USADO DE COCINA

---

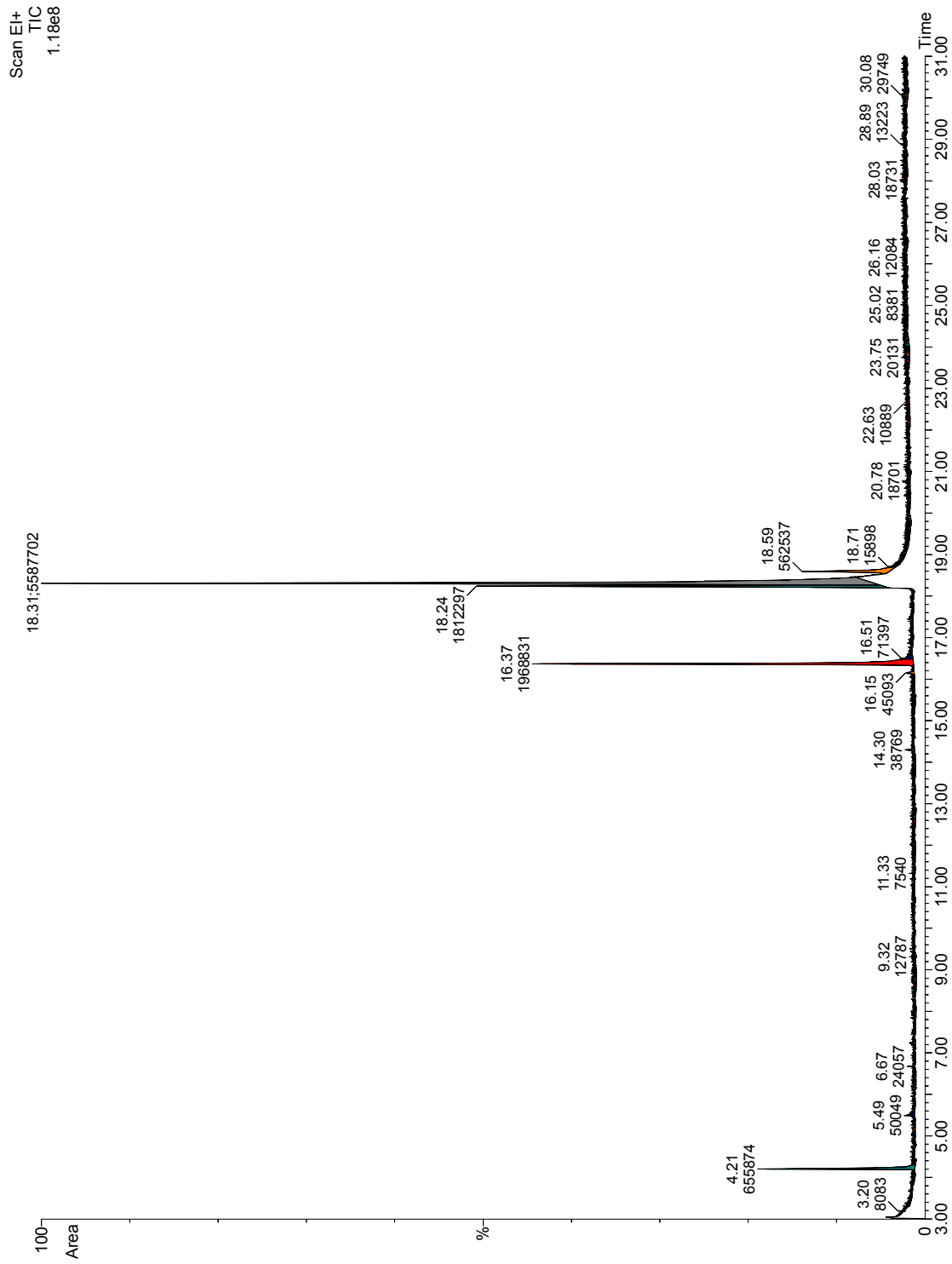


Figura A.1: Cromatograma biodiésel de aceite usado de cocina.

APÉNDICE B

DATOS DESTILACIONES ASTM  
D86-04 COMBUSTIBLES

---

Tabla B.1: Datos destilación D100.

|                           | Observado        | Corregido        |
|---------------------------|------------------|------------------|
| Presión barométrica (kPa) | 101.12           | 101.3            |
| % Vol. Recuperado         | Temperatura (°F) | Temperatura (°F) |
| IBP                       | 359.60           | 359.70           |
| 5                         | 393.80           | 393.91           |
| 10                        | 417.20           | 417.31           |
| 15                        | 432.50           | 432.61           |
| 20                        | 443.30           | 443.42           |
| 25                        | 457.70           | 457.82           |
| 30                        | 469.40           | 469.52           |
| 35                        | 482.00           | 482.12           |
| 40                        | 495.50           | 495.62           |
| 45                        | 508.10           | 508.23           |
| 50                        | 520.70           | 520.83           |
| 55                        | 535.10           | 535.23           |
| 60                        | 550.40           | 550.53           |
| 65                        | 563.90           | 564.04           |
| 70                        | 576.50           | 576.64           |
| 75                        | 591.80           | 591.94           |
| 80                        | 606.20           | 606.34           |
| 85                        | 621.50           | 621.64           |
| 90                        | 638.60           | 638.75           |
| 95                        | 660.20           | 660.35           |
| EBP                       | 692.60           | 692.76           |
| % Vol. Total recuperado   | 98.500           | 98.503           |
| % Vol. Residuo            | 1.150            | 1.143            |
| % Vol. Pérdidas           | 0.350            | 0.353            |

Tabla B.2: Datos destilación B100.

|                           | Observado        | Corregido        |
|---------------------------|------------------|------------------|
| Presión barométrica (kPa) | 101.12           | 101.3            |
| % Vol. Recuperado         | Temperatura (°F) | Temperatura (°F) |
| IBP                       | 208.40           | 208.48           |
| 5                         | 608.00           | 608.14           |
| 10                        | 614.30           | 614.44           |
| 15                        | 618.80           | 618.94           |
| 20                        | 622.40           | 622.55           |
| 25                        | 624.20           | 624.35           |
| 30                        | 626.00           | 626.15           |
| 35                        | 626.00           | 626.15           |
| 40                        | 626.00           | 626.15           |
| 45                        | 626.00           | 626.15           |
| 50                        | 627.80           | 627.95           |
| 55                        | 629.60           | 629.75           |
| 60                        | 629.60           | 629.75           |
| 65                        | 633.20           | 633.35           |
| 70                        | 633.20           | 633.35           |
| 75                        | 634.10           | 634.25           |
| 80                        | 638.60           | 638.75           |
| 85                        | 647.60           | 647.75           |
| 90                        | 662.00           | 662.15           |
| 95                        | 676.40           | 676.55           |
| EBP                       | 680.00           | 680.15           |
| % Vol. Total recuperado   | 98.000           | 97.996           |
| % Vol. Residuo            | 1.300            | 1.309            |
| % Vol. Pérdidas           | 0.700            | 0.696            |



Tabla B.3: Datos destilación E100.

|                           | Observado        | Corregido        |
|---------------------------|------------------|------------------|
| Presión barométrica (kPa) | 100.9            | 101.3            |
| % Vol. Recuperado         | Temperatura (°F) | Temperatura (°F) |
| IBP                       | 168.80           | 168.96           |
| 5                         | 168.80           | 168.96           |
| 10                        | 168.80           | 168.96           |
| 15                        | 168.80           | 168.96           |
| 20                        | 168.80           | 168.96           |
| 25                        | 168.80           | 168.96           |
| 30                        | 168.80           | 168.96           |
| 35                        | 168.80           | 168.96           |
| 40                        | 168.80           | 168.96           |
| 45                        | 168.80           | 168.96           |
| 50                        | 168.80           | 168.96           |
| 55                        | 168.80           | 168.96           |
| 60                        | 172.40           | 172.56           |
| 65                        | 176.00           | 176.16           |
| 70                        | 179.60           | 179.76           |
| 75                        | 194.00           | 194.17           |
| 80                        | 208.40           | 208.57           |
| 85                        | 230.00           | 230.18           |
| 90                        | 255.20           | 255.39           |
| 95                        | 302.00           | 302.21           |
| EBP                       | 323.60           | 323.81           |
| % Vol. Total recuperado   | 99.000           | 98.976           |
| % Vol. Residuo            | 0.000            | 0.048            |
| % Vol. Pérdidas           | 1.000            | 0.976            |

Tabla B.4: Datos destilación DB10E5.

|                           | Observado        | Corregido        |
|---------------------------|------------------|------------------|
| Presión barométrica (kPa) | 101.6            | 101.3            |
| % Vol. Recuperado         | Temperatura (°F) | Temperatura (°F) |
| IBP                       | 168.80           | 168.68           |
| 5                         | 176.00           | 175.88           |
| 10                        | 381.20           | 381.02           |
| 15                        | 404.60           | 404.42           |
| 20                        | 424.40           | 424.21           |
| 25                        | 440.60           | 440.41           |
| 30                        | 460.40           | 460.20           |
| 35                        | 475.70           | 475.50           |
| 40                        | 491.00           | 490.79           |
| 45                        | 505.40           | 505.19           |
| 50                        | 521.60           | 521.39           |
| 55                        | 536.00           | 535.78           |
| 60                        | 552.20           | 551.98           |
| 65                        | 565.70           | 565.47           |
| 70                        | 579.20           | 578.97           |
| 75                        | 590.00           | 589.77           |
| 80                        | 604.40           | 604.16           |
| 85                        | 618.80           | 618.56           |
| 90                        | 628.70           | 628.46           |
| 95                        | 644.00           | 643.75           |
| EBP                       | 662.00           | 661.75           |
| % Vol. Total recuperado   | 98.500           | 98.504           |
| % Vol. Residuo            | 0.900            | 0.892            |
| % Vol. Pérdidas           | 0.600            | 0.604            |

Tabla B.5: Datos destilación DB20E5.

|                           | Observado        | Corregido        |
|---------------------------|------------------|------------------|
| Presión barométrica (kPa) | 101.6            | 101.3            |
| % Vol. Recuperado         | Temperatura (°F) | Temperatura (°F) |
| IBP                       | 168.80           | 168.68           |
| 5                         | 179.60           | 179.48           |
| 10                        | 386.60           | 386.42           |
| 15                        | 411.80           | 411.62           |
| 20                        | 431.60           | 431.41           |
| 25                        | 453.20           | 453.00           |
| 30                        | 471.20           | 471.00           |
| 35                        | 494.60           | 494.39           |
| 40                        | 510.80           | 510.59           |
| 45                        | 528.80           | 528.58           |
| 50                        | 545.00           | 544.78           |
| 55                        | 559.40           | 559.18           |
| 60                        | 573.80           | 573.57           |
| 65                        | 585.50           | 585.27           |
| 70                        | 596.30           | 596.07           |
| 75                        | 606.20           | 605.96           |
| 80                        | 617.00           | 616.76           |
| 85                        | 624.20           | 623.96           |
| 90                        | 635.00           | 634.75           |
| 95                        | 647.60           | 647.35           |
| EBP                       | 662.00           | 661.75           |
| % Vol. Total recuperado   | 98.500           | 98.500           |
| % Vol. Residuo            | 1.000            | 1.000            |
| % Vol. Pérdidas           | 0.500            | 0.500            |

Tabla B.6: Datos destilación DB30E5

|                           | Observado        | Corregido        |
|---------------------------|------------------|------------------|
| Presión barométrica (kPa) | 101.5            | 101.3            |
| % Vol. Recuperado         | Temperatura (°F) | Temperatura (°F) |
| IBP                       | 168.80           | 168.72           |
| 5                         | 183.20           | 183.12           |
| 10                        | 400.10           | 399.98           |
| 15                        | 431.60           | 431.47           |
| 20                        | 456.80           | 456.67           |
| 25                        | 480.20           | 480.06           |
| 30                        | 500.00           | 499.86           |
| 35                        | 518.00           | 517.86           |
| 40                        | 539.60           | 539.45           |
| 45                        | 555.80           | 555.65           |
| 50                        | 570.20           | 570.05           |
| 55                        | 581.00           | 580.85           |
| 60                        | 591.80           | 591.64           |
| 65                        | 602.60           | 602.44           |
| 70                        | 609.80           | 609.64           |
| 75                        | 617.00           | 616.84           |
| 80                        | 624.20           | 624.04           |
| 85                        | 629.60           | 629.44           |
| 90                        | 638.60           | 638.44           |
| 95                        | 654.80           | 654.63           |
| EBP                       | 662.00           | 661.83           |
| % Vol. Total recuperado   | 98.500           | 98.497           |
| % Vol. Residuo            | 1.100            | 1.105            |
| % Vol. Pérdidas           | 0.400            | 0.397            |

Tabla B.7: Datos destilación DB40E5.

|                           | Observado        | Corregido        |
|---------------------------|------------------|------------------|
| Presión barométrica (kPa) | 101.5            | 101.3            |
| % Vol. Recuperado         | Temperatura (°F) | Temperatura (°F) |
| IBP                       | 168.80           | 168.72           |
| 5                         | 190.40           | 190.32           |
| 10                        | 403.70           | 403.58           |
| 15                        | 439.70           | 439.57           |
| 20                        | 466.70           | 466.57           |
| 25                        | 492.80           | 492.66           |
| 30                        | 519.80           | 519.66           |
| 35                        | 541.40           | 541.25           |
| 40                        | 559.40           | 559.25           |
| 45                        | 572.00           | 571.85           |
| 50                        | 584.60           | 584.45           |
| 55                        | 595.40           | 595.24           |
| 60                        | 602.60           | 602.44           |
| 65                        | 609.80           | 609.64           |
| 70                        | 617.00           | 616.84           |
| 75                        | 622.40           | 622.24           |
| 80                        | 626.00           | 625.84           |
| 85                        | 631.40           | 631.24           |
| 90                        | 638.60           | 638.44           |
| 95                        | 656.60           | 656.43           |
| EBP                       | 662.00           | 661.83           |
| % Vol. Total recuperado   | 98.500           | 98.495           |
| % Vol. Residuo            | 1.200            | 1.210            |
| % Vol. Pérdidas           | 0.300            | 0.295            |

Tabla B.8: Datos destilación DB10E10.

|                           | Observado        | Corregido        |
|---------------------------|------------------|------------------|
| Presión barométrica (kPa) | 101.8            | 101.3            |
| % Vol. Recuperado         | Temperatura (°F) | Temperatura (°F) |
| IBP                       | 168.80           | 168.60           |
| 5                         | 173.30           | 173.10           |
| 10                        | 197.60           | 197.39           |
| 15                        | 379.40           | 379.11           |
| 20                        | 410.90           | 410.59           |
| 25                        | 429.80           | 429.48           |
| 30                        | 449.60           | 449.27           |
| 35                        | 467.60           | 467.27           |
| 40                        | 483.80           | 483.46           |
| 45                        | 498.20           | 497.85           |
| 50                        | 516.20           | 515.84           |
| 55                        | 528.80           | 528.44           |
| 60                        | 541.40           | 541.03           |
| 65                        | 557.60           | 557.23           |
| 70                        | 573.80           | 573.42           |
| 75                        | 584.60           | 584.21           |
| 80                        | 600.80           | 600.41           |
| 85                        | 609.80           | 609.40           |
| 90                        | 624.20           | 623.80           |
| 95                        | 642.20           | 641.79           |
| EBP                       | 662.00           | 661.58           |
| % Vol. Total recuperado   | 98.000           | 98.010           |
| % Vol. Residuo            | 1.350            | 1.330            |
| % Vol. Pérdidas           | 0.650            | 0.660            |

Tabla B.9: Datos destilación DB20E10.

|                           | Observado        | Corregido        |
|---------------------------|------------------|------------------|
| Presión barométrica (kPa) | 101.8            | 101.3            |
| % Vol. Recuperado         | Temperatura (°F) | Temperatura (°F) |
| IBP                       | 168.80           | 168.60           |
| 5                         | 171.50           | 171.30           |
| 10                        | 195.80           | 195.59           |
| 15                        | 395.60           | 395.30           |
| 20                        | 424.40           | 424.09           |
| 25                        | 442.40           | 442.08           |
| 30                        | 467.60           | 467.27           |
| 35                        | 485.60           | 485.26           |
| 40                        | 505.40           | 505.05           |
| 45                        | 523.40           | 523.04           |
| 50                        | 537.80           | 537.44           |
| 55                        | 555.80           | 555.43           |
| 60                        | 570.20           | 569.82           |
| 65                        | 582.80           | 582.41           |
| 70                        | 593.60           | 593.21           |
| 75                        | 604.40           | 604.01           |
| 80                        | 611.60           | 611.20           |
| 85                        | 624.20           | 623.80           |
| 90                        | 635.00           | 634.59           |
| 95                        | 649.40           | 648.98           |
| EBP                       | 662.00           | 661.58           |
| % Vol. Total recuperado   | 98.000           | 98.017           |
| % Vol. Residuo            | 1.250            | 1.217            |
| % Vol. Pérdidas           | 0.750            | 0.767            |

Tabla B.10: Datos destilación DB30E10.

|                           | Observado        | Corregido        |
|---------------------------|------------------|------------------|
| Presión barométrica (kPa) | 101.4            | 101.3            |
| % Vol. Recuperado         | Temperatura (°F) | Temperatura (°F) |
| IBP                       | 168.80           | 168.76           |
| 5                         | 171.50           | 171.46           |
| 10                        | 192.20           | 192.16           |
| 15                        | 406.40           | 406.34           |
| 20                        | 435.20           | 435.14           |
| 25                        | 463.10           | 463.03           |
| 30                        | 485.60           | 485.53           |
| 35                        | 510.80           | 510.73           |
| 40                        | 532.40           | 532.33           |
| 45                        | 550.40           | 550.33           |
| 50                        | 568.40           | 568.32           |
| 55                        | 580.10           | 580.02           |
| 60                        | 590.00           | 589.92           |
| 65                        | 600.80           | 600.72           |
| 70                        | 609.80           | 609.72           |
| 75                        | 617.90           | 617.82           |
| 80                        | 623.30           | 623.22           |
| 85                        | 629.60           | 629.52           |
| 90                        | 640.40           | 640.32           |
| 95                        | 658.40           | 658.32           |
| EBP                       | 662.00           | 661.92           |
| % Vol. Total recuperado   | 98.000           | 98.003           |
| % Vol. Residuo            | 1.250            | 1.244            |
| % Vol. Pérdidas           | 0.750            | 0.753            |



Tabla B.11: Datos destilación DB40E10.

|                           | Observado        | Corregido        |
|---------------------------|------------------|------------------|
| Presión barométrica (kPa) | 101.4            | 101.3            |
| % Vol. Recuperado         | Temperatura (°F) | Temperatura (°F) |
| IBP                       | 168.80           | 168.76           |
| 5                         | 170.60           | 170.56           |
| 10                        | 194.00           | 193.96           |
| 15                        | 411.80           | 411.74           |
| 20                        | 447.80           | 447.74           |
| 25                        | 475.70           | 475.63           |
| 30                        | 507.20           | 507.13           |
| 35                        | 534.20           | 534.13           |
| 40                        | 554.00           | 553.93           |
| 45                        | 568.40           | 568.32           |
| 50                        | 582.80           | 582.72           |
| 55                        | 593.60           | 593.52           |
| 60                        | 603.50           | 603.42           |
| 65                        | 611.60           | 611.52           |
| 70                        | 615.20           | 615.12           |
| 75                        | 622.40           | 622.32           |
| 80                        | 626.00           | 625.92           |
| 85                        | 632.30           | 632.22           |
| 90                        | 640.40           | 640.32           |
| 95                        | 656.60           | 656.52           |
| EBP                       | 662.00           | 661.92           |
| % Vol. Total recuperado   | 98.000           | 98.001           |
| % Vol. Residuo            | 1.450            | 1.449            |
| % Vol. Pérdidas           | 0.550            | 0.551            |

Tabla B.12: Datos destilación DB10E20.

|                           | Observado        | Corregido        |
|---------------------------|------------------|------------------|
| Presión barométrica (kPa) | 101              | 101.3            |
| % Vol. Recuperado         | Temperatura (°F) | Temperatura (°F) |
| IBP                       | 168.80           | 168.92           |
| 5                         | 168.80           | 168.92           |
| 10                        | 170.60           | 170.72           |
| 15                        | 174.20           | 174.32           |
| 20                        | 194.90           | 195.03           |
| 25                        | 407.30           | 407.48           |
| 30                        | 429.80           | 429.99           |
| 35                        | 447.80           | 447.99           |
| 40                        | 467.60           | 467.80           |
| 45                        | 483.80           | 484.00           |
| 50                        | 501.80           | 502.01           |
| 55                        | 520.70           | 520.91           |
| 60                        | 538.70           | 538.92           |
| 65                        | 555.80           | 556.02           |
| 70                        | 572.00           | 572.23           |
| 75                        | 588.20           | 588.43           |
| 80                        | 600.80           | 601.04           |
| 85                        | 615.20           | 615.44           |
| 90                        | 629.60           | 629.84           |
| 95                        | 648.50           | 648.75           |
| EBP                       | 662.00           | 662.25           |
| % Vol. Total recuperado   | 98.000           | 97.987           |
| % Vol. Residuo            | 1.150            | 1.175            |
| % Vol. Pérdidas           | 0.850            | 0.837            |

Tabla B.13: Datos destilación DB20E20.

|                           | Observado        | Corregido        |
|---------------------------|------------------|------------------|
| Presión barométrica (kPa) | 101              | 101.3            |
| % Vol. Recuperado         | Temperatura (°F) | Temperatura (°F) |
| IBP                       | 168.80           | 168.92           |
| 5                         | 168.80           | 168.92           |
| 10                        | 171.50           | 171.62           |
| 15                        | 172.40           | 172.52           |
| 20                        | 194.00           | 194.13           |
| 25                        | 406.40           | 406.58           |
| 30                        | 432.50           | 432.69           |
| 35                        | 457.70           | 457.90           |
| 40                        | 481.10           | 481.30           |
| 45                        | 501.80           | 502.01           |
| 50                        | 521.60           | 521.81           |
| 55                        | 543.20           | 543.42           |
| 60                        | 559.40           | 559.62           |
| 65                        | 576.50           | 576.73           |
| 70                        | 590.00           | 590.23           |
| 75                        | 604.40           | 604.64           |
| 80                        | 613.40           | 613.64           |
| 85                        | 623.30           | 623.54           |
| 90                        | 635.00           | 635.25           |
| 95                        | 651.20           | 651.45           |
| EBP                       | 658.40           | 658.65           |
| % Vol. Total recuperado   | 97.000           | 96.957           |
| % Vol. Residuo            | 1.300            | 1.387            |
| % Vol. Pérdidas           | 1.700            | 1.657            |

Tabla B.14: Datos destilación DB30E20.

|                           | Observado        | Corregido        |
|---------------------------|------------------|------------------|
| Presión barométrica (kPa) | 101.3            | 101.3            |
| % Vol. Recuperado         | Temperatura (°F) | Temperatura (°F) |
| IBP                       | 168.80           | 168.80           |
| 5                         | 168.80           | 168.80           |
| 10                        | 170.60           | 170.60           |
| 15                        | 172.40           | 172.40           |
| 20                        | 194.00           | 194.00           |
| 25                        | 413.60           | 413.60           |
| 30                        | 447.80           | 447.80           |
| 35                        | 474.80           | 474.80           |
| 40                        | 503.60           | 503.60           |
| 45                        | 527.00           | 527.00           |
| 50                        | 550.40           | 550.40           |
| 55                        | 568.40           | 568.40           |
| 60                        | 586.40           | 586.40           |
| 65                        | 597.20           | 597.20           |
| 70                        | 606.20           | 606.20           |
| 75                        | 611.60           | 611.60           |
| 80                        | 622.40           | 622.40           |
| 85                        | 629.60           | 629.60           |
| 90                        | 636.80           | 636.80           |
| 95                        | 653.00           | 653.00           |
| EBP                       | 658.40           | 658.40           |
| % Vol. Total recuperado   | 97.00            | 97.00            |
| % Vol. Residuo            | 1.30             | 1.30             |
| % Vol. Pérdidas           | 1.70             | 1.70             |

Tabla B.15: Datos destilación DB40E20.

|                           | Observado        | Corregido        |
|---------------------------|------------------|------------------|
| Presión barométrica (kPa) | 100.6            | 101.3            |
| % Vol. Recuperado         | Temperatura (°F) | Temperatura (°F) |
| IBP                       | 168.80           | 169.08           |
| 5                         | 169.70           | 169.98           |
| 10                        | 171.50           | 171.78           |
| 15                        | 174.20           | 174.48           |
| 20                        | 188.60           | 188.89           |
| 25                        | 426.20           | 426.64           |
| 30                        | 471.20           | 471.67           |
| 35                        | 505.40           | 505.89           |
| 40                        | 539.60           | 540.11           |
| 45                        | 566.60           | 567.13           |
| 50                        | 584.60           | 585.14           |
| 55                        | 593.60           | 594.15           |
| 60                        | 600.80           | 601.35           |
| 65                        | 609.80           | 610.36           |
| 70                        | 615.20           | 615.76           |
| 75                        | 622.40           | 622.96           |
| 80                        | 626.00           | 626.57           |
| 85                        | 629.60           | 630.17           |
| 90                        | 640.40           | 640.98           |
| 95                        | 651.20           | 651.78           |
| EBP                       | 658.40           | 658.99           |
| % Vol. Total recuperado   | 96.000           | 95.815           |
| % Vol. Residuo            | 1.200            | 1.570            |
| % Vol. Pérdidas           | 2.800            | 2.615            |

## REFERENCIAS

---

- [1] Roger Perry and Ivan L. Gee. Vehicle emissions in relation to fuel composition. *Science of The Total Environment*, 169(1–3):149 – 156, 1995. Transport and Air Pollution.
- [2] Cenk Sayin and Mustafa Canakci. Effects of injection timing on the engine performance and exhaust emissions of a dual-fuel diesel engine. *Energy Conversion and Management*, 50(1):203 – 213, 2009.
- [3] BOE, Reglamento (UE) n° 136/2014 de la Comisión, de 11 de febrero de 2014, por el que se modifican la Directiva 2007/46/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, el Reglamento (CE) n° 692/2008 de la Comisión en lo que respecta a las emisiones procedentes de turismos y vehículos comerciales ligeros (Euro 5 y Euro 6) y el Reglamento (UE) n° 582/2011 de la Comisión en lo que respecta a las emisiones de los vehículos pesados (Euro VI). <https://www.boe.es/doue/2014/043/L00012-00046.pdf>, 2014.
- [4] J Gonzalez, M Gutierrez, M González, and A Botas. Catálisis, automóvil y medio ambiente. *Facultad de Ciencias, Universidad del Pais Vasco, Bilbao*, 2002.
- [5] José C. Escobar, Electo S. Lora, Osvaldo J. Venturini, Edgar E. Yáñez, Edgar F. Castillo, and Oscar Almazan. Biofuels: Environment, technology and food security. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(6–7):1275 – 1287, 2009.

- [6] Sven Teske, J Muth, S Sawyer, T Pregger, S Simon, T Naegler, M O’Sullivan, S Schmid, J Pagenkopf, B Frieske, et al. *Energy [r] evolution-a sustainable world energy outlook*. Greenpeace International, EREC and GWEC, 2012.
- [7] Ayhan Demirbas. Political, economic and environmental impacts of biofuels: a review. *Applied energy*, 86:S108–S117, 2009.
- [8] Ayhan Demirbas. Biofuels sources, biofuel policy, biofuel economy and global biofuel projections. *Energy Conversion and Management*, 49(8):2106 – 2116, 2008.
- [9] I.M. Atadashi, M.K. Aroua, and A. Abdul Aziz. High quality biodiesel and its diesel engine application: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(7):1999 – 2008, 2010.
- [10] Kahraman Bozbas. Biodiesel as an alternative motor fuel: Production and policies in the european union. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(2):542 – 552, 2008.
- [11] Özer Can, İsmet Çelikten, and Nazım Usta. Effects of ethanol addition on performance and emissions of a turbocharged indirect injection diesel engine running at different injection pressures. *Energy Conversion and Management*, 45(15–16):2429 – 2440, 2004.
- [12] Cenk Sayin. Engine performance and exhaust gas emissions of methanol and ethanol–diesel blends. *Fuel*, 89(11):3410 – 3415, 2010.
- [13] Eloisa Torres-Jimenez, Marta Svobljšak Jerman, Andreja Gregorc, Irenca Lisec, M Pilar Dorado, and Breda Kegl. Physical and chemical properties of ethanol–diesel fuel blends. *Fuel*, 90(2):795–802, 2011.
- [14] Gerhard Knothe, Jürgen Krahl, and Jon Van Gerpen. *The biodiesel handbook*. Elsevier, 2015.

- [15] Barry D. Solomon, Justin R. Barnes, and Kathleen E. Halvorsen. Grain and cellulosic ethanol: History, economics, and energy policy. *Biomass and Bioenergy*, 31(6):416 – 425, 2007.
- [16] Shelley Minteer. *Alcoholic fuels*. CRC Press, 2006.
- [17] Alan C Hansen, Qin Zhang, and Peter WL Lyne. Ethanol–diesel fuel blends—-a review. *Bioresource technology*, 96(3):277–285, 2005.
- [18] Avinash Kumar Agarwal, Dhananjay Kumar Srivastava, Atul Dhar, Rakesh Kumar Maurya, Pravesh Chandra Shukla, and Akhilendra Pratap Singh. Effect of fuel injection timing and pressure on combustion, emissions and performance characteristics of a single cylinder diesel engine. *Fuel*, 111:374–383, 2013.
- [19] Youngchul Ra, Rolf D Reitz, Joanna McFarlane, and C Stuart Daw. Effects of fuel physical properties on diesel engine combustion using diesel and biodiesel fuels. *SAE International Journal of Fuels and Lubricants*, 1(2008-01-1379):703–718, 2008.
- [20] Ludivine Pidol, Bertrand Lecointe, Laurie Starck, and Nicolas Jeuland. Ethanol–biodiesel–diesel fuel blends: performances and emissions in conventional diesel and advanced low temperature combustions. *Fuel*, 93:329–338, 2012.
- [21] Dattatray Babu Hulwan and Satishchandra V Joshi. Performance, emission and combustion characteristic of a multicylinder di diesel engine running on diesel–ethanol–biodiesel blends of high ethanol content. *Applied Energy*, 88(12):5042–5055, 2011.
- [22] Máté Zöldy. Ethanol–biodiesel–diesel blends as a diesel extender option on compression ignition engines. *Transport*, 26(3):303–309, 2011.
- [23] P Satgé De Caro, Z Mouloungui, Gilles Vaitilingom, and J Ch Berge. Interest



- of combining an additive with diesel–ethanol blends for use in diesel engines. *Fuel*, 80(4):565–574, 2001.
- [24] Lü Xing-cai, Yang Jian-Guang, Zhang Wu-Gao, and Huang Zhen. Effect of cetane number improver on heat release rate and emissions of high speed diesel engine fueled with ethanol–diesel blend fuel. *Fuel*, 83(14):2013–2020, 2004.
- [25] AC Hansen, MR Gratton, and W Yuan. Diesel engine performance and nox emissions from oxygenated biofuels and blends with diesel fuel. *Transactions of the ASABE*, 49(3):589–595, 2006.
- [26] S Fernando and M Hanna. Development of a novel biofuel blend using ethanol-biodiesel- diesel microemulsions: Eb-diesel. *Energy & Fuels*, 18(6):1695–1703, 2004.
- [27] S Fernando and M Hanna. Phase behavior of the ethanol-biodiesel-diesel micro-emulsion system. *Transactions of the ASAE*, 48(3):903–908, 2005.
- [28] Siddharth Jain and MP Sharma. Prospects of biodiesel from jatropha in india: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(2):763–771, 2010.
- [29] István Barabás and Adrian I Todoruț. Key fuel properties of biodiesel-diesel fuel-ethanol blends. Technical report, SAE Technical Paper, 2009.
- [30] Magín Lapuerta, Octavio Armas, and Reyes García-Contreras. Effect of ethanol on blending stability and diesel engine emissions. *Energy & Fuels*, 23(9):4343–4354, 2009.
- [31] Prommes Kwanchareon, Apanee Luengnaruemitchai, and Samai Jai-In. Solubility of a diesel–biodiesel–ethanol blend, its fuel properties, and its emission characteristics from diesel engine. *Fuel*, 86(7):1053–1061, 2007.
- [32] Xiaobing Pang, Xiaoyan Shi, Yujing Mu, Hong He, Shijin Shuai, Hu Chen, and Rulong Li. Characteristics of carbonyl compounds emission from a diesel-engine using biodiesel–ethanol–diesel as fuel. *Atmospheric environment*, 40(36):7057–7065, 2006.

- [33] D Somasundaram, A Elango, and S Karthikeyan. Combustion and emission analysis of fishing-boat diesel engine running on diesel-ethanol-biodiesel-ceria-alumina nano blends. *RNISCAIR-CSIR*, 2017.
- [34] SA Shahir, HH Masjuki, MA Kalam, A Imran, and AM Ashraful. Performance and emission assessment of diesel–biodiesel–ethanol/bioethanol blend as a fuel in diesel engines: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 48:62–78, 2015.
- [35] Su Han Park, Se Hun Kim, and Chang Sik Lee. Mixing stability and spray behavior characteristics of diesel- ethanol- methyl ester blended fuels in a common-rail diesel injection system. *Energy & Fuels*, 23(10):5228–5235, 2009.
- [36] Ertan Alptekin and Mustafa Canakci. Characterization of the key fuel properties of methyl ester–diesel fuel blends. *Fuel*, 88(1):75–80, 2009.
- [37] Istvan Barabas, Adrian Todoruț, and Doru Băldean. Performance and emission characteristics of an ci engine fueled with diesel–biodiesel–bioethanol blends. *Fuel*, 89(12):3827–3832, 2010.
- [38] Su Han Park, Junepyo Cha, and Chang Sik Lee. Impact of biodiesel in bioethanol blended diesel on the engine performance and emissions characteristics in compression ignition engine. *Applied Energy*, 99:334–343, 2012.
- [39] CE Ejim, BA Fleck, and A Amirfazli. Analytical study for atomization of biodiesels and their blends in a typical injector: surface tension and viscosity effects. *Fuel*, 86(10):1534–1544, 2007.
- [40] Su Han Park, Seung Hyun Yoon, and Chang Sik Lee. Hc and co emissions reduction by early injection strategy in a bioethanol blended diesel-fueled engine with a narrow angle injection system. *Applied energy*, 107:81–88, 2013.
- [41] István Barabás and Ioan-Adrian Todoruț. Utilization of biodiesel-diesel-ethanol blends in ci engine. In *Biodiesel-Quality, Emissions and By-Products*. InTech, 2011.

- [42] M Zöldy. The effect of bioethanol–biodiesel–diesel oil blends on cetane number and viscosity. In *6th international colloquium, January*, pages 10–11, 2007.
- [43] SA Shahir, HH Masjuki, MA Kalam, A Imran, IM Rizwanul Fattah, and A Sanjid. Feasibility of diesel–biodiesel–ethanol/bioethanol blend as existing ci engine fuel: An assessment of properties, material compatibility, safety and combustion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32:379–395, 2014.
- [44] Su Han Park, Hyung Jun Kim, Hyun Kyu Suh, and Chang Sik Lee. Experimental and numerical analysis of spray-atomization characteristics of biodiesel fuel in various fuel and ambient temperatures conditions. *International journal of heat and fluid flow*, 30(5):960–970, 2009.
- [45] José M Desantes and Francisco Payri González. *Motores de combustión interna alternativos*. Universidad Politécnica de Valencia, 2011.
- [46] Diesel technology. <http://www.drbjornsauto.com/diesel-technology/>.
- [47] Jaime Gimeno García. *Estudio de la inyección diésel mediante la medida del flujo de cantidad de movimiento del chorro*. Editorial Reverté, 2011.
- [48] Oscar Alejandro de la Garza de León. *Estudio de los efectos de la cavitación en toberas de inyección diesel sobre el proceso de inyección y el de formación de hollín*. PhD thesis, Universidad Politécnica de Valencia, 2012.
- [49] Luis Daniel Zapata. *Caracterización de los procesos de Inyección-Combustión Diesel mediante visualización y procesado digital de imágenes*. PhD thesis, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 2010.
- [50] Jose M Desantes, Raul Payri, Jose M Pastor, and J Gimeno. Experimental characterization of internal nozzle flow and diesel spray behavior. part i: nonevaporative conditions. *Atomization and sprays*, 15(5), 2005.
- [51] R Payri, JM Garcia, FJ Salvador, and J Gimeno. Using spray momentum flux measurements to understand the influence of diesel nozzle geometry on spray characteristics. *Fuel*, 84(5):551–561, 2005.

- [52] JM Desantes, R Payri, FJ Salvador, and J Gimeno. Measurements of spray momentum for the study of cavitation in diesel injection nozzles. Technical report, SAE Technical Paper, 2003.
- [53] Nasser Ashgriz. *Handbook of atomization and sprays: theory and applications*. Springer Science & Business Media, 2011.
- [54] Arthur H Lefebvre and Vincent G McDonell. *Atomization and sprays*. CRC press, 2017.
- [55] RD Reitz and FV Bracco. Mechanism of atomization of a liquid jet. *The Physics of Fluids*, 25(10):1730–1742, 1982.
- [56] Simón Martínez Martínez. *Desarrollo de una instalación experimental para el estudio de chorros diesel evaporados en atmósfera inerte y reactiva*. PhD thesis, Universidad Politécnica de Valencia, 2003.
- [57] Francisco Ruiz and L He. Turbulence inside a cavitating injector orifice: a different animal. *Proceedings of ILASS-America, Davis, CA, US*, 1998.
- [58] N Hay and PL Jones. Comparison of the various correlations for spray penetration. Technical report, SAE Technical Paper, 1972.
- [59] Yutaro Wakuri, Masaru Fujii, Tatsuo Amitani, and Reijiro Tsuneya. Studies on the penetration of fuel spray in a diesel engine. *Bulletin of JSME*, 3(9):123–130, 1960.
- [60] JC Dent. A basis for the comparison of various experimental methods for studying spray penetration. Technical report, SAE Technical Paper, 1971.
- [61] Jeffrey D Naber and Dennis L Siebers. Effects of gas density and vaporization on penetration and dispersion of diesel sprays. Technical report, SAE technical paper, 1996.
- [62] Sergei Sazhin. *Droplets and sprays*, volume 63. Springer, 2014.

- [63] Hiroyuki Hiroyasu, Masataka Arai, and Michihiko Tabata. Empirical equations for the sauter mean diameter of a diesel spray. Technical report, SAE Technical Paper, 1989.
- [64] Vlad Soare. *Phase doppler measurement in diesel dense sprays: optimisation of measurements and study of the orifice geometry influence over the spray at microscopic level*. PhD thesis, Universidad Politécnica de Valencia, 2007.
- [65] David Correas. *Estudio teórico-experimental del chorro libre diésel isoterma*. PhD thesis, Universidad Politécnica de Valencia, 1998.
- [66] D Brian Spalding. *Combustion and mass transfer: a textbook with multiple-choice exercises for engineering students*. Elsevier, 2013.
- [67] Sunggyu Lee, James G Speight, and Sudarshan K Loyalka. *Handbook of alternative fuel technologies*. crc Press, 2014.
- [68] Roberto Bermejo. *Un futuro sin petróleo*. Catarata, 2008.
- [69] James G Speight. *Fuel science and technology handbook*. New York, NY (USA); Marcel Dekker Inc., 1990.
- [70] Harold H Schobert. *The chemistry of hydrocarbon fuels*. Butterworth-Heinemann, 2013.
- [71] Ayhan Demirbas. *Biodiesel*. Springer, 2008.
- [72] Silvia Galafassi, Daniela Cucchetti, Francesca Pizza, Giuliana Franzosi, Daniele Bianchi, and Concetta Compagno. Lipid production for second generation biodiesel by the oleaginous yeast *rhodotorula graminis*. *Bioresource technology*, 111:398–403, 2012.
- [73] Roland Arthur Lee and Jean-Michel Lavoie. From first-to third-generation biofuels: Challenges of producing a commodity from a biomass of increasing complexity. *Animal Frontiers*, 3(2):6–11, 2013.

- [74] Carlos Álvarez Maciel. Biocombustibles: desarrollo histórico-tecnológico, 2016.
- [75] MartibRemschmidt Mittelbach et al. Biodiesel. the comprehensive handbook. Technical report, Martin Mittelbach, 2004.
- [76] Fangrui Ma and Milford A Hanna. Biodiesel production: a review. *Bioresource technology*, 70(1):1–15, 1999.
- [77] S Kent Hoekman, Amber Broch, Curtis Robbins, Eric Cenicerros, and Mani Natarajan. Review of biodiesel composition, properties, and specifications. *Renewable and sustainable energy reviews*, 16(1):143–169, 2012.
- [78] Jason Hill, Erik Nelson, David Tilman, Stephen Polasky, and Douglas Tiffany. Environmental, economic, and energetic costs and benefits of biodiesel and ethanol biofuels. *Proceedings of the National Academy of sciences*, 103(30):11206–11210, 2006.
- [79] CEN (European Committee for Standardization). EN 14214. Automotive fuels – fatty acid methyl esters (FAME) for diesel engines – requirements and test methods. Brussels, Belgium: CEN.
- [80] ASTM (American Society for Testing and Materials) International. D6751 Standard test method for biodiesel fuel blend stock (B100) for middle distillate fuels. ASTM, West Conshohocken, PA.
- [81] Gerhard Knothe. Dependence of biodiesel fuel properties on the structure of fatty acid alkyl esters. *Fuel processing technology*, 86(10):1059–1070, 2005.
- [82] Ayhan Demirbas. Relationships derived from physical properties of vegetable oil and biodiesel fuels. *Fuel*, 87(8):1743–1748, 2008.
- [83] Gerhard Knothe and Luis F. Razon. Biodiesel fuels. *Progress in Energy and Combustion Science*, 58:36 – 59, 2017.
- [84] Ye Sun and Jiayang Cheng. Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: a review. *Bioresource technology*, 83(1):1–11, 2002.

- [85] Luiz Carlos Uchôa Junqueira et al. *Biología celular y molecular*. McGraw-Hill Interamericana,, 1998.
- [86] Carlos A Cardona and Óscar J Sánchez. Fuel ethanol production: process design trends and integration opportunities. *Bioresource technology*, 98(12):2415–2457, 2007.
- [87] Juan Manuel García and J García. Biocarburantes líquidos: biodiesel y bioetanol. *Informe de Vigilancia Tecnológica*, 2006.
- [88] TM Letcher. Diesel blends for diesel-engines. *South African Journal of Science*, 79(1):4–7, 1983.
- [89] De-gang Li, Huang Zhen, Lü Xingcai, Zhang Wu-gao, and Yang Jian-Guang. Physico-chemical properties of ethanol–diesel blend fuel and its effect on performance and emissions of diesel engines. *Renewable energy*, 30(6):967–976, 2005.
- [90] Karen Schou Pedersen, Aage Fredenslund, and Per Thomassen. *Properties of oils and natural gases*, volume 5. Gulf Pub Co, 1989.
- [91] ASTM (American Society for Testing and Materials) International. D1298-99 Standard test method for density, relative density, or api gravity of crude petroleum and liquid petroleum products by hydrometer method. ASTM, West Conshohocken, PA.
- [92] ASTM (American Society for Testing and Materials) International. D86-04 Standard test method for distillation of petroleum products at atmospheric pressure. ASTM, West Conshohocken, PA.
- [93] Mohammad R Riazi and Taher A Al-Sahhaf. Physical properties of heavy petroleum fractions and crude oils. *Fluid Phase Equilibria*, 117(1-2):217–224, 1996.

- [94] ASTM (American Society for Testing and Materials) International. D4737-96a Standard test method for calculated cetane index by four variable equation. ASTM, West Conshohocken, PA.
- [95] Omar Torres Garza. Efecto de los parámetros de inyección sobre el proceso de mezcla en un motor diésel. Master's thesis, Facultad de ingeniería mecánica y eléctrica. Universidad Autónoma de Nuevo León., 2016.
- [96] Luis Fernando Rúa Mojica. Estudio numérico y experimental de los parámetros macroscópicos de chorros de inyección diésel para combustibles alternativos. una metodología robusta y libre. Master's thesis, Facultad de ingeniería mecánica y eléctrica. Universidad Autónoma de Nuevo León., 2017.
- [97] E Delacourt, B Desmet, and B Besson. Characterisation of very high pressure diesel sprays using digital imaging techniques. *Fuel*, 84(7):859–867, 2005.
- [98] Sergio Borrego, Óscar A. de la Garza, Miguel García-Yera, G. Rubio-Gómez, and S. Martínez-Martínez. Caracterización del proceso de mezcla a través de la visualización del chorro diésel líquido. *Memorias XXII CONGRESO SOMIM*, 2017.
- [99] SUBJECT TO CHANGE THEREFORE, MAYNOTBE AS, and A SAUDI STANDARD UNTIL APPROVED. *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*. BIPM, 1995.
- [100] Shirley Zamara Vargas and José Avelino Olaya. Elaboración de curvas de destilación de hidrocarburos líquidos pertenecientes a la sub-cuenca neiva: Método astm D86-04. *Ingeniería y Región*, 9:37–45, 2012.
- [101] Sydney Young, Ernest Briggs, et al. *Distillation principles and processes*. Macmillan, 1922.
- [102] Magín Lapuerta, José Rodríguez-Fernández, David Fernández-Rodríguez, and Rayda Patiño-Camino. Modeling viscosity of butanol and ethanol blends with diesel and biodiesel fuels. *Fuel*, 199(Supplement C):332 – 338, 2017.



- [103] Pedro Benjumea, John Agudelo, and Andres Agudelo. Basic properties of palm oil biodiesel–diesel blends. *Fuel*, 87(10):2069–2075, 2008.
- [104] CEN (Comité Europeo de Normalización). EN590:2014 Combustible para automoción - Diésel - Requisitos y métodos de ensayo. UNE.
- [105] ASTM (American Society for Testing and Materials) International. D975-98b Standard specification for diesel fuel oils. ASTM, West Conshohocken, PA.
- [106] Robert Bosch. *Sistemas de inyección diesel por acumulador Common Rail*. Reverté, 2005.
- [107] Carsten Baumgarten. *Mixture formation in internal combustion engines*. Springer Science & Business Media, 2006.
- [108] Xiangang Wang, Zuohua Huang, Olawole Abiola Kuti, Wu Zhang, and Keiya Nishida. Experimental and analytical study on biodiesel and diesel spray characteristics under ultra-high injection pressure. *International journal of heat and fluid flow*, 31(4):659–666, 2010.
- [109] José M Desantes, Raúl Payri, Antonio García, and Julien Manin. Experimental study of biodiesel blends effects on diesel injection processes. *Energy & Fuels*, 23(6):3227–3235, 2009.
- [110] Seoksu Moon, Taku Tsujimura, Yuan Gao, Suhan Park, Jin Wang, Naoki Kurimoto, Yoshiaki Nishijima, and Mitsuharu Oguma. Biodiesel effects on transient needle motion and near-exit flow characteristics of a high-pressure diesel injector. *International Journal of Engine Research*, 15(4):504–518, 2014.
- [111] Hiro Hiroyasu and Masataka Arai. Structures of fuel sprays in diesel engines. Technical report, SAE Technical Paper, 1990.
- [112] T Berg, J Deppe, D Michaelis, H Voges, and S Wissel. Comparison of particle size and velocity investigations in sprays carried out by means of different measurement techniques. In *International conference on liquid atomization and spray systems*, page 7, 2006.

- [113] Jun Mo, Chenglong Tang, Junge Li, Li Guan, and Zuohua Huang. Experimental investigation on the effect of n-butanol blending on spray characteristics of soybean biodiesel in a common-rail fuel injection system. *Fuel*, 182:391–401, 2016.
- [114] Sanghoon Lee, Chang Sik Lee, Sungwook Park, Jai Gopal Gupta, Rakesh Kumar Maurya, and Avinash Kumar Agarwal. Spray characteristics, engine performance and emissions analysis for karanja biodiesel and its blends. *Energy*, 119:138–151, 2017.
- [115] Dong Han, Jiaqi Zhai, Yaozong Duan, Dehao Ju, He Lin, and Zhen Huang. Macroscopic and microscopic spray characteristics of fatty acid esters on a common rail injection system. *Fuel*, 203:370–379, 2017.
- [116] Lars Zigan, Ingo Schmitz, Alexandre Flügel, M Wensing, and A Leipertz. Structure of evaporating single-and multicomponent fuel sprays for 2nd generation gasoline direct injection. *Fuel*, 90(1):348–363, 2011.