

**Universitat Politècnica de València**

**Master en ingeniería aeronáutica**

**Trabajo Final de Máster**



---

**ESTUDIO EXPERIMENTAL OPTICO SOBRE  
INYECCION DIRECTA USANDO UN INYECTOR  
MULTIORIFICIO BAJO CONDICIONES DE FLASH  
BOILING Y SPRAY COLLAPSE**

---

**Autor del trabajo:**

Alejandro Ortega Arribas

**Codirector del trabajo:**

Pedro Martí Gómez Aldaraví

**Director del trabajo:**

Raúl Payri

**Supervisor del trabajo:**

Abián Bautista Rodríguez

---

València, junio de 2020



**ESTUDIO EXPERIMENTAL OPTICO SOBRE  
INYECCION DIRECTA USANDO UN INYECTOR  
MULTIORIFICIO BAJO CONDICIONES DE FLASH  
BOILING Y SPRAY COLLAPSE**

por Alejandro Ortega Arribas  
Universitat Politècnica de València, 2020



---

# Agradecimientos

---

*A mi madre y a mi hermano por ser los pilares de mi vida. A Raúl payri y al equipo de inyección en general por confiar en mi en este proyecto y en especial a Abián Bautista por haberme aportado sus conocimientos en la materia y ser un buen compañero.*

*“El verdadero progreso es el que pone la tecnología al alcance de todos”  
- Henry Ford*



---

# Resumen

---

En este trabajo se ha investigado el sistema de inyección para motores GDi (Gasolina de Inyección Directa) como método a sustituir al anterior sistema PFi (Inyección por conducto) y que implicaciones tiene en el medio ambiente. El motivo de este trabajo es para descubrir cual es el comportamiento de la inyección en la cámara de combustión. Para comprender estas situaciones se ha tratado en un capítulo la metodología física, las características hasta el momento conocidas y propiedades físicas. Se ha hablado desde el punto de vista teórico físico, el funcionamiento de un motor, el sistema de inyección y movimiento de arrastre del aire en la cámara de combustión, así como los fenómenos físicos como Spray collapse que ocurren en el momento de la inyección. Para esta acometida, se diseñó y se construyó una maqueta para experimentar la inyección. Además, se ha requerido de conocimientos en óptica para la grabación de los experimentos con tres cámaras de alta velocidad, cada uno con una técnica de captación de imágenes: MIE, DBI, Schlieren. Se ha experimentado en el sistema de inyección en campo cercano, observando penetración, ángulo de chorro, velocidad. Por último, se ha procedido al procesamiento de las imágenes, extracción de datos recogidos y conclusiones. En este análisis se ha utilizado softwares matemáticos, algoritmos y códigos de procesamiento y compilación.

**Palabras clave:** GDi, Spray Collapse, Sistemas ópticos, procesamiento de imágenes.





---

# Abstract

---

In this work, the injection system for GDi (Direct Injection Gasoline) engines has been investigated as a method to replace the previous PFI (Injection through duct) system and its implications for the environment. The reason for this work is to discover what is the behavior of the injection in the combustion chamber.

In order to understand these situations, physical methodology, hitherto known characteristics and physical properties have been discussed in a chapter. From the theoretical physical point of view, the operation of an engine, the injection system and the air entrainment movement in the combustion chamber have been discussed, as well as physical phenomena such as Spray collapse that occur at the time of injection.

For this attack, a model was designed and built to experiment with injection. In addition, optical knowledge has been required for the recording of the experiments with three high-speed cameras, each with an imaging technique: MIE, DBI, Schlieren. It has been experimented in the injection system in the near field, observing penetration, jet angle, speed.

Finally, the images have been processed, data collected and conclusions have been extracted. In this analysis, mathematical software, algorithms and processing and compilation codes have been used.

**Keywords:** GDi, Spray Collapse, Optical systems, penetration, image processing.



---

# Resum

---

En aquest treball, el sistema d'injecció de motors de GDi (injecció directa) ha estat investigat com un mètode per reemplaçar el sistema anterior de PFi (injecció de conducte) i que té implicacions mediambientals. La raó d'aquest treball és esbrinar quin és el comportament de la injecció a la Cambra de combustió.

Per entendre aquestes situacions, s'ha discutit la metodologia física, les característiques conegudes i propietats físiques en un capítol. S'ha parlat des del punt de vista teòric físic, el funcionament d'un motor, el sistema d'injecció i el moviment d'arrossegament de l'aire a la Cambra de combustió, així com els fenòmens físics com el col·lapse d'esprai que es produeixen en el moment de la injecció.

Per a aquest enquesta, una maqueta va ser dissenyada i construïda per experimentar la injecció. A més, s'ha requerit el coneixement òptic per enregistrar experiments amb tres càmeres d'alta velocitat, cadascuna amb una tècnica de captura d'imatge: MIE, DBI, Schlieren. S'ha experimentat en el sistema d'injecció en un camp proper, observant la penetració, l'angle de raig, la velocitat.

Finalment, les imatges han estat processades, dades recollides i conclusions extretes. Aquesta anàlisi ha utilitzat programari matemàtic, algorismes i codis de processament i compilació.

Paraules clau: GDi, col·lapse d'esprai, sistemes òptics, processament d'imatges



---

# Tabla de contenidos

---

<b>Agradecimientos</b>	<b>V</b>	
<b>Resumen VII</b>		
<b>Tabla de contenidos</b>	<b>XIII</b>	
<b>Índice de ilustraciones</b>	<b>XVII</b>	
<b>Índice de tablas</b>	<b>XXVII</b>	
<b>Nomenclatura</b>	<b>XXIX</b>	
<b>Símbolos XXXI</b>		
<b>Memoria 1</b>		
<b>1. Introducción</b>	<b>3</b>	
1.1. Contexto general		3
1.2. Situación actual de los sistemas de propulsión de los vehículos		7
1.2.1. Motor de gasolina .....		7
1.2.2. Motor Diesel .....		8
1.2.3. Motor híbrido.....		9
1.2.4. Baterías eléctricas .....		10
1.2.5. Tabla comparativa y principales conclusiones .....		11
1.3. Sistema GDI versus sistema convencional PFI		12
1.4. Objetivos y justificación del Trabajo		14
1.5. Esquema del Trabajo		15
1.6. Softwares informáticos		16
<b>2. Fundamentos teóricos y metodología experimental de trabajo</b>	<b>19</b>	
2.1. Introducción histórica		19
2.2. De la máquina de vapor externa al motor de combustión interna		24
2.3. Motor de encendido provocado o motor Otto de 4 tiempos		25
2.3.1. Ciclo Otto.....		25
2.3.2. Componentes principales de un motor .....		26
2.4. Sistemas de inyección		27
2.4.1. Tipos de sistemas de inyección. Formación de mezcla aire-combustible .....		27
2.4.1.1. Carburador		28
2.4.1.2. Inconvenientes del carburador elemental		29
2.4.2. Inyección por colector de admisión PFI.....		29
2.4.3. Inyección directa GDI.....		32

2.4.3.1.	<i>Carga estratificada</i>	32
2.4.3.2.	<i>Carga homogénea</i>	33
2.5.	<b>Inyector</b>	<b>34</b>
2.5.1.	<i>Partes de un inyector</i>	34
2.5.2.	<i>Tipos de inyectores de fuel para motores GDI</i>	36
2.5.2.1.	<i>Inyector de accionamiento por solenoide multiorificio</i>	37
2.5.2.2.	<i>Inyector piezoeléctrico multiorificio</i>	40
2.6.	<b>Combustibles</b>	<b>42</b>
2.6.1.	<i>Funciones del combustible</i>	42
2.6.2.	<i>Propiedades del combustible</i>	42
2.6.3.	<i>Presión de vapor. Características de los combustibles de estudio</i>	44
<b>3.</b>	<b>Caracterización del spray en el campo lejano</b>	<b>51</b>
3.1.	<b>Morfología general del spray</b>	<b>52</b>
3.2.	<b>Secuencia de procesos durante la inyección del chorro líquido</b>	<b>53</b>
3.2.1.	<i>Atomización Primaria</i>	54
3.2.2.	<i>Atomización secundaria</i>	58
3.3.	<b>Movimiento del aire e interacción con el combustible</b>	<b>58</b>
3.3.1.	<i>Caracterización del flujo</i>	59
3.3.2.	<i>movimiento del aire en el cilindro</i>	60
3.3.2.1.	<i>Swirl</i>	60
3.3.2.2.	<i>Squish</i>	61
3.3.2.3.	<i>Tumble</i>	63
3.4.	<b>Flash boiling and spray collapse</b>	<b>64</b>
3.4.1.	<i>Flash boiling</i>	64
3.4.1.1.	<i>Mecanismos microscópicos de formación de Flash-boiling</i>	66
3.4.2.	<i>Spray collapse</i>	70
3.4.2.1.	<i>Influencia de presión y temperatura</i>	70
3.4.2.2.	<i>Geometría de la tobera</i>	71
3.4.2.3.	<i>Interacción entre chorros</i>	71
3.4.2.4.	<i>Condensación del spray multiorificio</i>	72
<b>4.</b>	<b>Metodología experimental de trabajo</b>	<b>77</b>
4.1.	<b>Sistema de alimentación</b>	<b>77</b>
4.2.	<b>Sistema común - rail</b>	<b>79</b>
4.2.1.	<i>Conducto de salida del combustible de alta presión y segundo común rail</i>	81
4.3.	<b>Sistema de inyección experimental</b>	<b>82</b>
4.4.	<b>Maqueta de experimentación</b>	<b>84</b>
4.5.	<b>Sistemas ópticos de visualización</b>	<b>86</b>
4.5.1.	<i>Técnica Schlieren</i>	89
4.5.2.	<i>Técnica DBI</i>	91
4.6.	<b>Sistema de regulación control y sensores</b>	<b>92</b>
4.6.1.	<i>Equipos de gobierno y control de información</i>	93
4.6.2.	<i>Aparatos de control</i>	96
4.7.	<b>Sistema de control asistido por ordenador</b>	<b>96</b>
4.8.	<b>Metodología de procesamiento de datos e imágenes del spray de chorro de estudio</b>	<b>97</b>
4.8.1.	<i>Procesamiento de imágenes</i>	98
4.8.2.	<i>Procesamiento del contorno</i>	100

<b>5.</b>	<b>Resultados</b>	<b>105</b>
5.1.	Puntos de Ensayo Experimental	106
5.1.1.	<i>Criterios a la hora de hacer los ensayos.....</i>	<i>107</i>
5.2.	Composición del fuel: isoctano	108
5.3.	Metodología de extracción de datos	110
5.4.	Penetración del Spray	115
5.4.1.	<i>Efecto de la densidad .....</i>	<i>115</i>
5.4.2.	<i>Efecto de la presión de inyección.....</i>	<i>119</i>
5.4.3.	<i>Efecto de la presión ambiente.....</i>	<i>122</i>
5.4.4.	<i>Comparativa con otros autores .....</i>	<i>123</i>
5.5.	Angulo de Spray	126
5.5.1.	<i>Evaluación del método de ángulos.....</i>	<i>126</i>
5.5.2.	<i>Efecto de la densidad en la atomización.....</i>	<i>130</i>
5.5.3.	<i>Efecto de la presión ambiente.....</i>	<i>135</i>
5.6.	Velocidad de penetración	137
5.6.1.	<i>Efectos de la presión ambiente .....</i>	<i>138</i>
5.6.2.	<i>Efectos de la presión de inyección .....</i>	<i>139</i>
5.7.	Ancho de Spray	141
5.8.	Ángulos de estabilización	142
5.9.	Error de Desviación estándar de penetración	144
<b>6.</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>147</b>
<b>7.</b>	<b>Líneas de Trabajo Futuras</b>	<b>151</b>
<b>8.</b>	<b>Bibliografía</b>	<b>153</b>
<b>9.</b>	<b>Pliego de Condiciones</b>	<b>163</b>
9.1.	Generalidades	163
9.2.	Definiciones y alcance del pliego	163
9.3.	Contenido	164
9.4.	Condiciones técnicas	164
9.4.1.	<i>Instalación .....</i>	<i>164</i>
9.4.2.	<i>Condiciones de salud y seguridad laboral .....</i>	<i>165</i>
9.4.3.	<i>Obligaciones y derechos de los trabajadores .....</i>	<i>166</i>
9.4.3.1.	<i>Artículo 14. Derecho a la protección frente a los riesgos laborales.</i>	<i>166</i>
9.4.3.2.	<i>Artículo 16. Plan de prevención de riesgos laborales, evaluación de los riesgos y planificación de la actividad preventiva.</i>	<i>167</i>
9.4.3.3.	<i>Artículo 17. Equipos de trabajo y medios de protección.</i>	<i>168</i>
9.4.3.4.	<i>Superficies y cubicación</i>	<i>169</i>
9.4.3.4.1.	Sistema de iluminación de emergencia	169
9.4.3.4.2.	control de ventilación y de temperatura	169
9.4.3.5.	<i>Protección contra contactos en equipos eléctricos</i>	<i>171</i>
9.4.3.6.	<i>Recomendaciones sobre materias inflamables</i>	<i>172</i>
9.4.3.7.	<i>Prevención y extinción de incendios</i>	<i>172</i>
9.4.3.8.	<i>Uso de material LED</i>	<i>174</i>
9.4.3.9.	<i>Uso de material óptico</i>	<i>177</i>
9.4.4.	<i>Obligaciones y derechos de los recursos informáticos.....</i>	<i>178</i>
9.4.4.1.	<i>Plazo de adaptación de los equipos que incluyan pantallas de visualización.</i>	<i>178</i>
9.4.4.2.	<i>Vigilancia de la salud</i>	<i>178</i>
9.4.4.2.1.	Equipos y sistemas de computarización	179

9.4.5. Fases de construcción del banco de ensayos .....	180
9.4.6. Puestas en marcha.....	185
9.4.7. Inventario: Especificaciones de material y equipos.....	186
9.4.8. Organigrama: planificación y organización del proyecto .....	192
9.5. Condiciones facultativas	195
9.5.1. Obligaciones y derechos del contratista .....	195
9.5.2. Obligaciones y facultades de la dirección facultativa .....	196
9.6. Condiciones económicas	196
9.7. Condiciones legales	197
9.7.1. Contratista .....	198
9.7.2. Contrato.....	198
<b>10. Presupuesto 201</b>	
10.1. Generalidades	201
10.2. Recursos y personal	202
10.3. Investigación recogida de información y análisis de la misma	202
10.3.1. Seguimiento del trabajo .....	203
10.4. Coste de la mano de obra: Montaje y Puesta en Marcha	203
10.5. Equipos y materiales	204
10.6. Diseño CAD Posprocesado de imágenes	205
10.7. Redacción Trabajo Final de Master	206
10.8. Presupuesto de ejecución por contrata	206
10.9. Presupuesto total	207
<b>Anexos 209</b>	
<b>11. Anexo: Planos Descriptivos 211</b>	
Anexo A: Problemas de montaje del banco de ensayos	211
Anexo B: Imágenes de procesado	215
Anexo C: Planos Descriptivos	219
Anexo D: Cartel representativo	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>



---

# Índice de ilustraciones

---

1. Producción global de vehículos por países principales de la economía global vs periodo de años (1950-2018). Se observa la tendencia siempre al alza, salvo en la crisis de la economía del 2010, de los vehículos. esta tendencia a producido un aumento de CO2. Fuente: [2]. ..... 4
2. Emisiones de Carbono (toneladas por millón) por año y población (1751-2013). Se observa la función exponencial que llevan las emisiones de carbono proporcional a la población mundial. es lógico pensar que es necesario tomar medidas drásticas. Gráfico: James P. Galasyn. Fuente: [4][5]. ..... 5
3. Emisiones de CO2 originadas por el transporte en la Unión Europea UE (2016). Fuente: [11]. ..... 7
4. Esquema de motor de gasolina (izquierda) y Esquema de motor de Diesel (derecha). Se puede apreciar la diferencia ya que el de gasolina utiliza la bujía y no tiene precámara y el Diesel no utiliza bujía, pero si precámara. Fuente: [17][18]. ..... 9
5. Esquema de motor híbrido (izquierda) y Esquema de batería eléctrica (derecha). Se puede apreciar la diferencia ya que el híbrido emplea un motor de combustión interna alternativo MCI y el otro es 100% eléctrico. Fuente: [19]. ..... 10
6. Sistema PFI (Izquierda) y Sistema GDI (Derecha.). Fuente: [29]. ..... 14
7. Dibujos de la patente del Motor de Gas de Nicolaus Otto. Se trata de los primeros bocetos del primer motor de combustión a volumen constante. Fuente [26]. ..... 20
8. Máquina de Herón de Alejandría. Año 120 a.C. Se considera la primera invención de máquina de vapor antigua y base fundamental de lo que se conoce hoy a la rama de la ciencia y de la ingeniería dedicada a turbo maquinaria. Fuente: [30]. ..... 21

---

9. Máquinas de Savery (Izquierda) Año 1711 y Newcomen (Derecha) año 1712. Fuente:[31].	22
10. Máquina de vapor de James Watt. Año 1774. Fuente:[31].	23
11. Grabado de la patente de la máquina de Alphonse Eugene Beau de Rochas (1862). Fue el primero en establecer como método clave la compresión de la carga en el cilindro antes de la compresión. Fuente: [30]	24
12. Fases de un motor de combustión interna de 4 tiempos. De izquierda a derecha: 1) Admisión, 2) Compresión, 3) Expansión, 4) Escape. Fuente:[26].	26
13. Evolución (de izquierda a derecha) de los sistemas de formación de mezclas en los motores de gasolina. Fuente: [33].	27
14. Esquema básico de un carburador elemental. En ella se aprecia. 1) Cuba; 2) Difusor; 3) Calibre; 4) Válvula. Fuente: [32]	28
15. Sección longitudinal del sistema de inyección PFI. Fuente: [28]	30
16. localización de la sonda lambda (azul) y sonda lambda "reguladora" (rojo). En medio el catalizador de partículas de tres vías. Fuente:[35].	31
17. Modos de carga homogénea (Izquierda) y estratificada (Derecha). Fuente: [36]...	33
18. Representación de los modos de carga para el sistema GDI en situación de plena carga para el caso de carga homogénea (Izquierda) y a carga parcial para carga estratificada (Derecha). Fuente: [37].	34
19. Vista sección de un inyector de accionamiento electromagnético general. Se observan las siguientes partes enumeradas: Conducto de entrada con filtro (1), conector eléctrico (2), bobina electromagnética (3), cuerpo porta inyector (4), vástago magnético (5), cuerpo del inyector (6), aguja del inyector (7). Fuente: [26].	35
20. Clasificación de los tipos de inyector. Fuente: Elaboración propia.	37
21. Inyector tipo solenoide de estudio. imagen de perfil (izquierda), imagen de frontal donde se puede visualizar el número de agujeros (derecha). Fuente: Elaboración propia en el Centro de motores Térmicos (CMT).	38
22. diseño virtual de las toberas o agujeros de inyección. Fuente: obtenido de [42].	39
23. Diagrama de proceso del inyector de combustible piezoeléctrico. Fuente: [44].	41
24. salidas de spray de los dos tipos de inyector, inyector piezoeléctrico (izquierda), inyector solenoide (derecha). Fuente: [16].	41
25. Grafica Comparativa y ejemplificativa de la presión de vapor de la sustancia chlorodisilane y chloride. Se muestra como aumenta la presión a medida que aumenta la temperatura. Eje y de la izquierda representa la escala del compuesto Chlorodisilane, en el eje de la derecha del compuesto Chloride. Fuente: [47].	45

---

26. Descripción grafica general de las fases vapor y liquido de un compuesto en función de presión y temperatura. También se observa la línea de presión de vapor. Fuente: [48].	46
27. esquema de torre de destilación. se observa a medida aumentan la temperatura se van separando los diferentes enlaces del petróleo. También se observa la gasolina se encuentra es el segundo escalón empezando por arriba lo que indica que sus enlaces son débiles. Fuente: [49].	47
28. composición química de los diferentes tipos de combustibles de estudio experimental. Hexano (Izquierda superior), Pentano (Derecha inferior), Isooctano (Izquierda inferior), Heptano (Derecha inferior). Fuente: Internet.	48
29. Morfología y parámetros fundamentales del spray. Fuente: [16].	52
30. geometría del inyector de investigación TME. Fuente: [54].	53
31. Regímenes de atomización primaria. Se puede observar a medida que aumenta el número de Reynolds y el número de Ohnesorge: el régimen de Rayleigh, régimen primario, régimen secundario, atomización. Fuente: [55][56]. Adaptado: [57].	56
32. Visualización directa de los regímenes del fluido para $Re: 2727$ . De izquierda a derecha: Régimen Rayleigh, 1º interacción, 2º interacción, atomización. Fuente: [55][56]. Adaptado: [57].	57
33. Formación de la cavitación en el seno de un fluido de un conducto. la formación de las burbujas sigue la ecuación de conservación de Bernoulli y es la diferencia de presiones la que lo forma. Fuente: [55].	57
34. visualización de los movimientos de la turbulencia: convención y difusión o disipación. esto genera turbulencia rotacional o vórtice. [58].	60
35. Fenómenos de movimiento rotacional del aire. A la izquierda (swirl) circula alrededor del eje alineado con el cilindro y a la derecha (tumble) circula perpendicular respecto del eje del cilindro. Fuente: [59].	61
36. Fenómeno squish en una cámara de combustión. Fuente: [60].	62
37. fenómenos de squish y tumble: Fuente: [61].	62
38. Fenómeno de tumble o movimiento rotacional normal al eje del cilindro. Fuente: Internet.	63
39. Formación del fenómeno tumble en función de la inclinación del colector de la admisión. Fuente: [26].	64
40. Ejemplo de vaporización del fuel n-hexano. Se muestra el diagrama temperatura inyeccion-presion ambiente. Tambien se obseva la curva de vaporacion del propio combustible, es logico que se encuentre entre los dos estados liquido-vapor. Si nos desplazamos a la zona izquierda de la curva nos encontramos con flash boiling. Los puntos representan los casos de estudio. Fuente: [62].	65

---

41. Procedimiento del flash boiling. Fuente: extraído de [16] [62].	66
42. Proceso visual de la formación de las burbujas. de izquierda a derecha: nucleación, crecimiento y estallido [16][63].	68
43. Representación de los dos regímenes de flash boiling originados sobre la curva de vaporización del fuel. Se observa en la región central los dos regímenes y a los lados las dos fases de líquido y vapor. Fuente: [63].	69
44. Comparación de la morfología de los sprays de salida entre monoorificio y multiorificio. Datos para $P_{amb}=1 \text{ atm}$ ; $T_{fuel}= 30^\circ, 90^\circ, 130^\circ$ . Con el factor de sobrecalentamiento y a bajas presión igual a la de saturación pierde calidad la atomización, pero no se aprecia colapso. Como ya se verá, para multiorificio si aparece colapso. Fuente: [62].	71
45. Imágenes de morfología de los sprays de salida de ejemplo de colapso de spray. estas medidas han sido tomadas a $T_{fuel}=60^\circ\text{C}$ , $P_{iny}= 120 \text{ bar}$ . $P_{amb}=0.1,0.3,0.6 \text{ bar}$ . Se puede observar como a medida que disminuye mas la presión ambiente, los chorros se unen mas y se acercan al eje axial del inyector. Fuente: [63].	72
46. Imágenes de la morfología de salida de los sprays con colapso. Se observa cerca de la salida condensación del flujo debido a la bajada de la presión ambiente. Fuente: [69].	73
47. descripción visual de la interacción de los chorros y zona que queda en el eje axial del inyector a bajas presiones. Fuente: [69].	74
48. Morfología de la salida de spray en campo lejano y con colapso. se observa que el chorro llega más lejos. El colapso incrementa la penetración. Fuente: [16].	74
49. Morfología de salida de los sprays en campo lejano. se visualiza la morfología con colapso inducido (izquierda) y con colapso de condensación (derecha). Fuente: [70].	75
50. Equipo de alimentación y bombeo de fuel para el sistema de inyección, vista posterior. Se observa en la parte central el cuadro eléctrico del motor eléctrico, el sistema de refrigeración lubricante combustible. Fuente: Centro de Motores Térmicos (24/02/2020).	78
51. Equipo de alimentación y bombeo de fuel para el sistema de inyección, vista anterior. Se observa en la parte central la bomba que mueve el circuito de fuel, tubos de suministro de transporte y de retorno; en la parte inferior el motor eléctrico, depósito de aceite para el sistema y su correspondiente bomba de impulso y barómetro de control; en el lado izquierdo de la imagen el depósito de fuel, cuadro eléctrico; y ambos lados y con forma de tetraedro están los sistemas de refrigeración agua – combustible (izquierda) lubricante – refrigerante (derecha). Fuente: Centro de Motores Térmicos (24/02/2020).	79

---

52. Common rail. su objetivo es transmitir el combustible de manera uniforme. Tiene las siguiente tes partes de arriba abajo: cableado de unión del ecu con la válvula, conducto de retorno, conducto de salida y transmisión al otro rail, conducto de entrada de combustible. Fuente: Centro de Motores Térmicos (24/02/2020).....	80
53. Segundo Common Rail. su objetivo es transmitir el combustible de manera uniforme y mitigar las ondas de presión. Tiene las siguiente tes partes de arriba abajo: conducto de salida al inyector, válvula de seguridad de presión, sensor de presión. Se observa en la parte inferior de la imagen el conducto de transmisión de combustible antes comentado. Fuente: Centro de Motores Térmicos (24/02/2020) .....	81
54. Sistema de inyección. es un conjunto que lleva las siguientes piezas: inyector, pieza de unión con la maqueta (lleva a su vez 2 juntas tóricas, 1 visible en la imagen y otra dentro), esta pieza esta agujereada para dejar pasar refrigerante, conductos comunicantes de refrigeración, bulón de fijación. Fuente: Centro de Motores Térmicos (03/03/2020) .....	82
55. Detalle del inyector con el conducto de unión al segundo Common rail. también se observa la conexión eléctrica del regulador del inyector. Fuente: Centro de Motores Térmicos (03/03/2020). .....	83
56. Vista de sección de diseño simulado tridimensional del inyector insertado en la porta inyector. en la porta inyector se ha trabajado unos conductos por donde pasa el líquido de refrigeración que baña la oquedad formada alrededor del inyector para calentar el fuel. Hay dos juntas tóricas arriba y abajo para que no se escape el líquido refrigerante. Fuente: Centro de Motores Térmicos. ....	84
57. Maqueta experimental. Fuente: Centro de Motores Térmicos (24/02/2020) .....	85
58. Detalles de la cara 6: resistencia de calor (Izquierda), rejilla (derecha). Fuente: Centro de Motores Térmicos (03/03/2020) .....	86
59. localización y situación de los componentes que constituyen los sistemas ópticos. Diseño asistido por ordenador por el programa software AutoCAD® de la compañía propietaria Autodesk®. Fuente: Elaboración propia.....	87
60. Fotografía donde se ven las tres técnicas aplicadas listas para los ensayos. Fuente: Elaboración propia (10/03/2020).....	91
61. Esquema Representativo de las conexiones que hay entre los equipos de gobierno y control con los de actuación y potencia. En colores se representa los diferentes estados de comunicación (Hidráulica, neumática, eléctrica). Fuente: Elaboración propia.....	93
62. Localización y nombramiento de los equipos de gobierno. Fuente: Elaboración propia (13/03/2020).....	94

---

63. ejemplo de situación y localización de un termopar. termopar de control de la parte superior interna de la maqueta. Fuente: Elaboracion propia (21/02/2020).....	95
64. Esquema de la localización de los ordenadores en la sala paralela de la sala de ensayos.....	97
65. Ejemplo de procesamiento de imágenes para una imagen de Schlieren. Se visualiza en las imágenes la descripción en las líneas superiores del procesamiento de imágenes. Arriba a la izquierda, imagen original. Centro superior, original con fondo sustraído. Arriba a la derecha, binarización en bruto. Abajo a la izquierda, filtro de erosión aplicado. Centro inferior, área mínima y filtros de dilatación aplicados. Abajo a la derecha, imagen original con contorno detectado superpuesto. Fuente: [1]..	100
66. Imágenes DBI a diferentes condiciones de temperatura y densidad con los contornos detectados superpuestos para mostrar la metodología de determinación del ángulo. Fuente: [1].	101
67. Imágenes de Schlieren a diferentes condiciones de temperatura y densidad con los contornos detectados superpuestos para mostrar la metodología de determinación de ángulo para la fase de vapor. Fuente: [1].	102
68. Ejemplo de cómo visualizar el contraste de luz de fondo. Fuente: Elaboración propia.	108
69. curva de vaporación del isooctano con los puntos de ensayo de estudio parametrizados. Fuente: Elaboración propia.	110
70. Ejemplo de edición de ConfigCamera. Fuente: Elaboración propia,	111
71. captura de imagen parte del procedimiento de metodología de extracción de datos. En ella se puede ver que se interactua con la imagen. Fuente: Elaboración propia.	111
72. Ejemplo de cálculo del número de pixeles por milímetro. Fuente: Elaboración propia.	112
73. Ejemplo de edición de ImageProcessing. Elaboración propia.	113
74. Ejemplo de demostración de captación del contorno del spray. Tiempo de ejecución: 33 $\mu$ s. P_back:10 bar; P_inj: 200bar. Fuente: Elaboración propia.	114
75. Grafica de penetración: Variación de la densidad en diferentes presiones de inyección en función del tiempo. Arriba (a) presión de inyección a 100bar; medio (b) presión de inyección a 200 bar; abajo (c) presión de inyección a 280 bar. Temperatura Fuel a 90°C (363 K). Temperatura ambiente a 25°C (298 K). Fuente: Elaboración propia.	117
76. Grafica de penetración: Variación de la densidad en diferentes presiones de inyección en función del tiempo. Arriba (a) Temperatura ambiente 500 K; abajo (b) Temperatura ambiente de 700 K. Fuente: Elaboración propia.	118

---

77. Grafica de penetración: Variación de la presión de inyección en diferentes presiones ambiente en función del tiempo. Arriba (a) presión de ambiente a 0,5 bar; medio (b) presión de ambiente a 3 bar; abajo (c) presión de ambiente a 10 bar. Temperatura fuel a 90°C. Temperatura ambiente 25°. Fuente: Elaboración propia. .... 120
78. Arriba (a): Variación de la velocidad a diferentes presiones de inyección [100 bar, 200 bar y 280 bar] en función del tiempo. Presión ambiente de 0.5 bar, temperatura fuel 90°C (363 K). Visualización del inicio de dos inyecciones a 0.35  $\mu$ s y presión ambiente 0.5 bar. Izquierda (b): presión inyección 100 bar, Derecha (c): presión inyección 280 bar. En amarillo se muestra la diferencia de salidas de chorro donde a la derecha se puede apreciar una onda de compresión que se propaga en el resto. Fuente: Elaboración propia..... 122
79. Grafica de penetración: Variación de la presión ambiente en diferentes presiones de inyección en función del tiempo. Arriba (a) presión de inyección a 100bar; abajo (c) presión de inyección a 280 bar. Temperatura fuel a 90°C. Temperatura ambiente a 25°C. Fuente: Elaboración propia..... 123
80. Evaluación de graficas de penetración: comparación de presiones de inyección [100 bar, 200 bar, 280 bar] a presión ambiente de 3 bar en función del tiempo. Arriba (a) Temperatura ambiente 573 K. Grafica de Daniele Arduino, UPV, 2019. Abajo (b) Temperatura ambiente 298 K. Grafica de Alejandro ortega arribas, UPV, 2020. Fuente: Elaboración propia..... 124
81. Evaluación de graficas de penetración: comparación de presiones ambiente [0.5 bar, 1 bar, 3 bar, 6 bar, 10 bar] a presión de inyección de 3 bar en función del tiempo. Arriba (a) Temperatura ambiente 293 K. Grafica de Yanfei Li, Pekín, 2018. Abajo (b) Temperatura ambiente 298 K. Grafica de Alejandro ortega arribas, UPV, 2020. Fuente: Elaboración propia..... 125
82. Método de ángulos. Fuente: [76]..... 127
83. Método de evaluación de ángulo. arriba (a) instantánea de ensayo a presión ambiente de 3 bar y presión de inyección de 280 bar, tercera repetición del ensayo, tomada 0.8  $\mu$ s después del inicio. Abajo (b) diferentes métodos de captación de ángulos de ese punto de ensayo. Se señala mediante dos barras el momento de la instantánea y el modelo que se acerca al verdadero ángulo. Fuente: Elaboración propia. .... 128
84. Método de evaluación de ángulo. arriba (a) instantánea de ensayo a presión ambiente de 1 bar y presión de inyección de 100 bar, tercera repetición del ensayo, tomada 0.8  $\mu$ s después del inicio. Abajo (b) diferentes métodos de captación de ángulos de ese punto de ensayo. Se señala mediante dos barras el momento de la

---

instantánea y el modelo que se acerca al verdadero ángulo. Fuente: Elaboración propia.....	130
85. Evaluación de ángulos: representación de los ángulos de chorro de Spray en diferentes condiciones de densidad en función del tiempo y a una presión de inyección de 200 bar. Temperatura ambiente 25°. Temperatura fuel 90° C (363 K). Fuente: Elaboración propia.....	131
86. Evaluación de ángulos: representación de los ángulos de chorro de Spray en diferentes condiciones de densidad en función del tiempo y a una presión de inyección de 280 bar. Temperatura ambiente 25° C (298 K). Temperatura fuel 90°. Fuente: Elaboración propia.....	132
87. Evaluación de ángulos: representación de los ángulos de chorro de Spray en diferentes condiciones de densidad en función del tiempo y a una presión de inyección de 200 bar. Temperatura ambiente 300° C (573 K) Fuente: [74].....	133
88. Evaluación de ángulos: representación de los ángulos de chorro de Spray en diferentes condiciones de densidad en función del tiempo y a una presión de inyección de 200 bar. Temperatura ambiente 227° C (500 K). Fuente: [1].....	134
89. Evaluación de ángulos: representación de los ángulos de chorro de Spray en diferentes condiciones de presión de inyección en función del tiempo. Arriba a) Presión ambiente 0.5 bar. Abajo b) Presión ambiente 10 bar. Temperatura fuel 90° (363 K). Temperatura ambiente 25° C (298 K). Fuente: Elaboración propia. ....	135
90. Representación visual de instantáneas a 0.2 $\mu$ s y 0.5 $\mu$ s respectivamente en los puntos de estudio de la gráfica 89. Fuente: Elaboración propia.....	137
91. Evaluación de velocidades: Representación de las velocidades de penetración en función del tiempo ASOI para diferentes condiciones de presión de inyección. Arriba a) Presión ambiente 0.5 bar. Abajo b) Presión ambiente 10 bar. Fuente: Elaboración propia. ....	139
92. Evaluación de velocidades: Representación de las velocidades de penetración en función del tiempo ASOI para diferentes condiciones de presión ambiente. Arriba a) Presión de inyección de 100 bar. Abajo b) Presión de inyección de 280 bar. Fuente: Elaboración propia. ....	140
93. Evaluación de ancho de chorro: se representa los anchos de chorro de algunas condiciones de ensayo en función del tiempo. Las medidas están tomadas a 0.05 mm del final de la cabeza del inyector en el eje axial. Se ha tomado las instantáneas en la 5ª repetición de 10°. Temperatura fuel 90° (363 K) Temperatura ambiente 25° C (298 K). Fuente: Elaboración propia. ....	141
94. Evaluación de ancho de chorro: se representa los anchos de chorro en función del tiempo. Las medidas están tomadas a 0.05 mm del final de la cabeza del inyector en	

---



el eje axial. Se ha tomado las instantáneas en la 5ª repetición de 10°. Temperatura fue 90°C (363 K) Temperatura ambiente 25° C (298 K). Fuente: Elaboración propia. .....	142
95. Ángulos de estabilización. Se indican con líneas azules discontinuas los intervalos de tiempo en el que los ángulos permanecen estables. Se ha aplicado el metodo corroborado Fitted Angle (FitS1). Fuente: Elaboración propia .....	143
96. Ángulos de estabilización. Se representa los ángulos de estabilización de todas condiciones de estudio en función de la diferencia de presión. Fuente: Elaboración propia. ....	144
97. representación de la distribución de error muestral en la famosa campana de Gauss. Las líneas azules discontinuas representan el intervalo de confianza al $1\sigma$ . Fuente: Elaboración propia. ....	145
98. representación del error porcentual en los diferentes puntos de ensayo experimental de este trabajo. En equis negrita es el error en porcentaje del error medio de los 10 ensayos de cada punto de ensayo. Fuente: Elaboración propia. ....	145
99. Situación de la sala de ensayos donde se puede observar en la parte central el banco de ensayos. El rojo esta dibujado la zona por donde se debe pasar y en recuadros rojos son las zonas desde donde se tiene que manipular los objetos, aparatos ópticos y demás equipos eléctricos y electrónicos. ....	165
100. Requisitos específicos a utilizar sobre el tipo de lase LED. En recuadro rojo esta recogida la información sobre el tipo de laser a usar. Fuente: [80]. ....	176
101. expone un ejemplo de marcado de gafas de protección para un láser de Neodimio: YAG en el infrarrojo, a 1060 nm, que ha pasado las condiciones de ensayo para láser continuo y pulsado. Fuente: [80]. ....	177
102. Etiqueta de advertencia por uso de Laser Led. Es obligatoria en los productos láser de las clases 2, 2M, 3R, 313 y 4. Fuente: [80]. ....	177
103. 1 fase de construcción. Sistema de alimentación de combustible. Fuente: Elaboración propia. ....	181
104. 2 fase de construcción. Colocacion y acondicionamiento de la maqueta y mesas ópticas. ....	181
105. 3 fase de construcción. Sistemas common rail y transporte del fuel a la maqueta .....	182
106. 4 fase de construcción. Se conectan los equipos y aparatos de medición y control de gobierno. ....	183
107. 6 fase de construcción. Establecimiento de las conexiones finales .....	184
108. 7 fase de construcción. Ensamblaje de todos los equipos ópticos. ....	185

109. Problemas de montaje. Fuga de aire por presión en la soldadura. A la izquierda se ve la función de la pieza que es apoyar la resistencia, a la derecha en una imagen aumentada se ve la grieta en la soldadura. .... 212

110. En las dos imágenes de observa la pieza ya soldada. En la izquierda en el momento posterior de la soldadura. En la derecha la pieza ya soldada. .... 213

111. Imágenes de procesado..... 217

---

# Índice de tablas

---

1.1. Tabla comparativa de los principales motores descritos. Se compara las ventajas e inconvenientes de los motores. Fuente: Elaboración propia.....	11
2.1. Descripción geométrica del tipo de inyector de estudio. Fuente: obtenido de [41]. .....	38
2.2. Condiciones de funcionamiento del inyector de estudio. Fuente: [41].	40
2.3 . características físicas de los diferentes tipos combustibles de estudio experimental. Los datos extraídos están referenciados a temperatura ambiente (300K). Fuente: [50][51][52][53].	49
4.1. Datos de entrada del sistema de inyección. Fuente: Elaboración propia.	83
4.2. descripción cualitativa de las tres técnicas de empleo en este estudio.	88
4.3. Configuración técnica y cuantitativa de las cámaras que se emplean.	88
4.4. Configuración cuantitativa del LED que se emplea en la técnica DBI.....	89
5.5.1. puntos de ensayo experimental. Fuente: Elaboración propia.	107
5.5.2. composición y propiedades del iso octano. Fuente: Elaboración propia.....	109
9.1. Localización geográfica y características. Fuente: Elaboración propia.	165
9.2. Inventario. Sistema de alimentación. Fuente: Elaboración propia.	187
9.3. Inventario. Sistema de transporte Common Rail. Fuente: elaboración propia ....	188
9.4. Inventario. Banco de pruebas principal	188
9.5. Inventario. Sistemas de equipos eléctricos y electrónicos	189
9.6. Inventario. Sistemas ópticos.	190
9.7. Inventario. Sistemas informáticos.....	191
9.8. Diagrama Gantt. Planificación y organización por días del proyecto.	193

---

10.1.Presupuesto: Empleados y personal del proyecto y Trabajo Final de Master. Fuente: Elaboración propia.....	202
10.2. Presupuesto: Investigación y análisis. Fuente: Elaboración propia. ....	202
10.3. Presupuesto. Seguimiento del trabajo. Fuente: Elaboración propia. ....	203
10.4. Presupuesto: Coste de mano de obra. Fuente: Elaboración propia.....	203
10.5. Presupuesto. Equipos y materiales. Fuente: Elaboración propia.....	205
10.6. Presupuesto. Diseño y postprocesado. Fuente: Elaboración propia.....	205
10.7. Presupuesto. Redacción Trabajo Final de Master. Fuente: Elaboración propia. .....	206

---

# Nomenclatura

---

WMO	Organización mundial de la meteorología (World Meteorological Organization)
GDI	Inyección directa de Gasolina (Gasoline Direct Injection)
PFI	Port Fuel Injected
ECU	Unidad electrónica de control (Electronic control unit)
ECN	Engine Combustion Network
ROM	Numero de octano de investigación
MON	Numero de octano de motor
CNT	Teoría clásica de nucleación (Classical nucleation theory)
SOI	tiempo de inicio de la inyección
ASOI	Después del tiempo de inicio de la inyección



---

# Símbolos

---

$P$	Presión	mmHg
$A$	Constante tabulada de Antoine	
$B$	Constante tabulada de Antoine	
$C$	Constante tabulada de Antoine	
$T$	Temperatura	°C
$Re$	Reynolds	
$\rho_a$	densidad del aire	kg/m <sup>3</sup>
$u_0$	velocidad de salida	m/s
$d_0$	tamaño característico	m
$\rho_f$	Densidad del combustible	kg/m <sup>3</sup>
$\mu_f$	viscosidad del combustible	kg/ms
$We$	Webber	
$\sigma$	tensión superficial del combustible	kg/s <sup>2</sup>
$Oh$	Ohnesorge	
$\Delta P$	Diferencia de presión	
$\Delta T$	Diferencia de temperatura	
$P_{sat}$	Presión de saturación	kPa
$T_{sat}$	Presión de saturación	°C
$P_{amb}$	Presión ambiente	kPa
$T_{fuel}$	Temperatura del fuel	°C
$J$	Tasa de nuclacion	
$m$	Masa molecular	Kg/mol
$\Delta G^*$	Energía libre de Gibbs	J

---

$K_b$	Constante de Boltzman	J/K
$T_{inj}$	Temperatura de inyección	°C
$\vartheta_l$	Volumen específico del estado líquido	
$\Delta\mu$	diferencia de potencial químico entre las fases líquida y de vapor	
$n$	Índice de refracción	
$\rho$	Densidad del gas	kg/m <sup>3</sup>
$K_{GD}$	Constante de Gladstone y Dale	
$L$	Longitud de camino óptico	m
$n_0$	Índice de refracción del entorno	







Documento I

**Memoria**



## Capítulo 1

---

# 1. Introducción

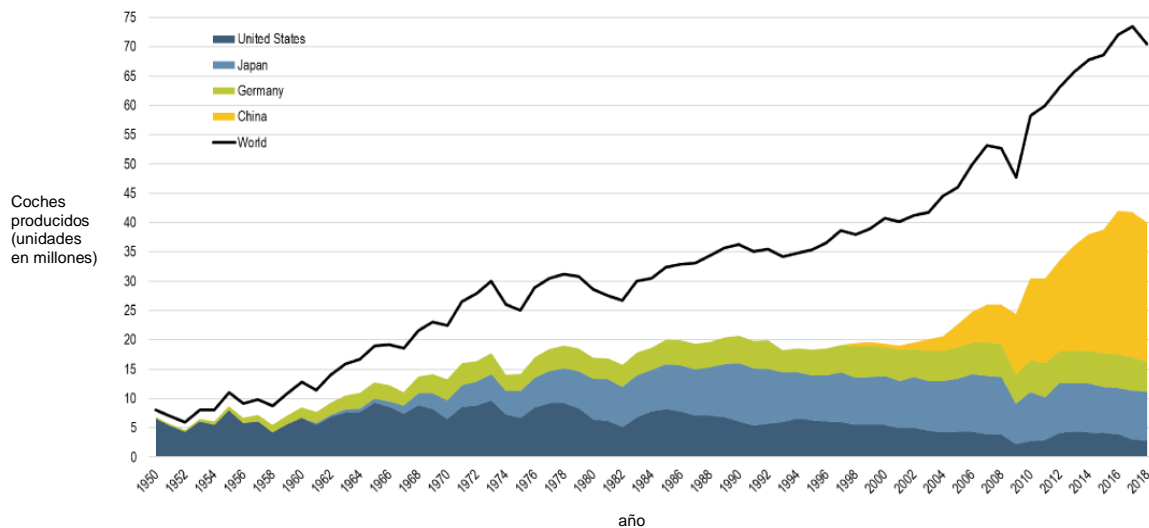
---

En esta introducción se va a ahondar en la situación actual en la que se encuentran los motores de combustión interna. Se verá la problemática que ha surgido por las emisiones contaminantes por parte de los motores, cuanto afecta y de qué modo al medio ambiente y que medias regulatorias están aplicando los gobiernos europeos. También se indicará los motores que existen hoy en día en el mercado de la automoción y se describirá brevemente las cualidades principales de cada uno, así como sus ventajas e inconvenientes. Luego, tras esta visión general, se va a conducir al tema específico que va a tratar este trabajo. Primeramente, y ya dentro de los sistemas de inyección de los motores de gasolina, cuales son y porque unos sistemas han sido degradados y otros, los más eficientes, se siguen utilizando. En segundo lugar, se justificará el trabajo para acabar este primer capítulo con los objetivos principales a perseguir del trabajo.

### 1.1. Contexto general

El vehículo de automoción se ha convertido, desde su invención en 1885 por Benz, en el medio de transporte más usado y es un motor de la economía mundial a escala. Este

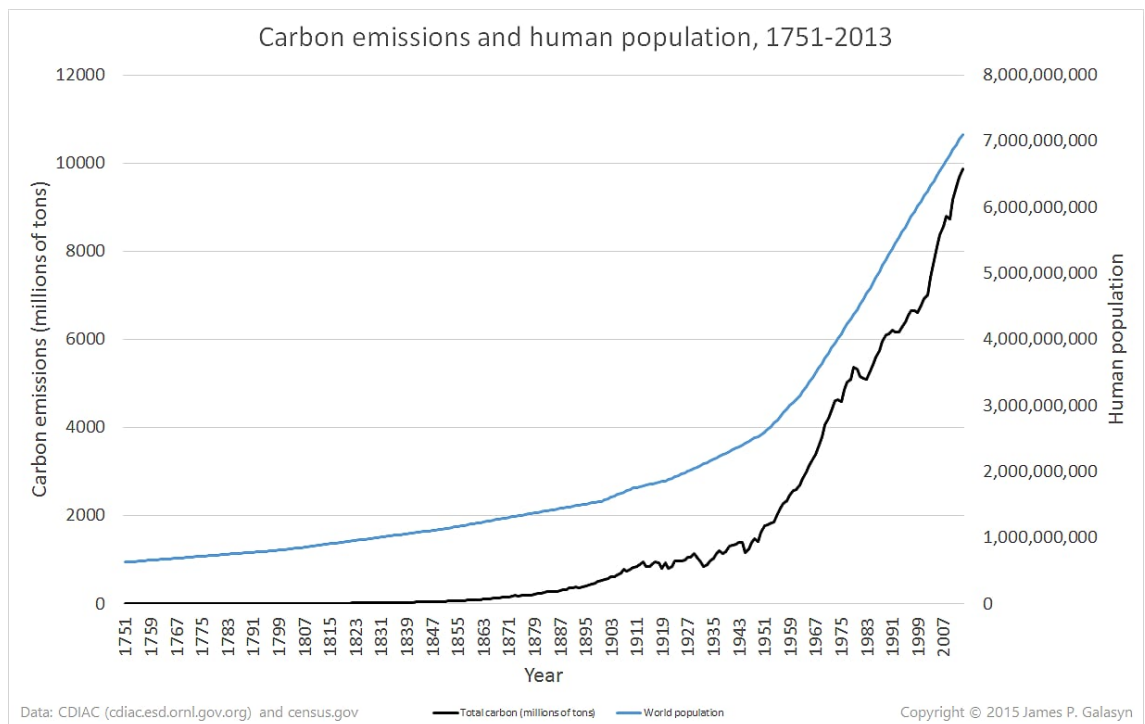
medio de transporte se mueve a través de un motor de combustión interna, la primera invención data del 1870, que transforma la energía química de los combustibles en energía mecánica (movimiento) mediante la liberación controlada de una reacción de combustión [1]. La combustión genera gases peligrosos o nocivos para la salud del ser humano como los gases de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) y demás partículas.



1. Producción global de vehículos por países principales de la economía global vs periodo de años (1950-2018). Se observa la tendencia siempre al alza, salvo en la crisis de la economía del 2010, de los vehículos. esta tendencia a producido un aumento de CO<sub>2</sub>. Fuente: [2].

Actualmente, con el uso generalizado de los motores y las emisiones causadas por la reacción de combustión de los combustibles provocan que se haya disparado el nivel de contaminación por las emisiones generadas por los vehículos anteriormente comentado en la figura 1, especialmente en las grandes ciudades donde se utiliza el vehículo como medio de desplazamiento. Este aspecto está causando varias consecuencias negativas en el planeta como:

- Calentamiento global: Las actividades industriales de las que depende nuestra civilización moderna han elevado los niveles de dióxido de carbono atmosférico de 280 partes por millón a 412 partes por millón en los últimos 150 años [3]. El dióxido de Carbono es un componente importante de la atmósfera, que se libera a través de procesos naturales como la respiración y las erupciones volcánicas de forma artificial a través de actividades humanas como la deforestación y la quema de combustibles fósiles. Como se puede observar en la imagen 2 Los humanos han aumentado la concentración atmosférica de CO<sub>2</sub> en más de un tercio desde que comenzó la Revolución Industrial. Este es el "forzamiento" más importante de larga duración del cambio climático [3].



2. Emisiones de Carbono (toneladas por millón) por año y población (1751-2013). Se observa la función exponencial que llevan las emisiones de carbono proporcional a la población mundial. es lógico pensar que es necesario tomar medidas drásticas. Gráfico: James P. Galasyn. Fuente: [4][5].

- Efecto invernadero: es así llamado al efecto causante de los gases contaminantes que provocan el incremento de la temperatura de la Tierra. El mundo actualmente está un grado centígrado más caliente que antes de que irrumpiera la industrialización, de acuerdo a la Organización Mundial Meteorológico (WMO, por sus siglas en inglés). La temperatura global promedio para los primeros 10 meses de 2018 fue 0,98 grados por encima de los niveles que existían entre 1850 y 1900 y si esta tendencia continúa, la temperatura global aumentará entre 3°C y 5°C para el año 2100 [6].
- Deshilo de los polos: la extensión del hielo marino del Ártico ha disminuido, cayendo por debajo de los 4 millones de kilómetros cuadrados. En comparación con las condiciones de septiembre en las décadas de 1980 y 1990, esto representa una reducción del 45% en el área del Océano Ártico cubierto por hielo marino [7][8].

Debido a estas consecuencias negativas y otras secundarias, Europa, los Estados Unidos y Asia están aumentando las regulaciones de contaminantes para mantener las necesidades sociales de aire limpio y especialmente mitigar las emisiones de CO<sub>2</sub>. Estas regulaciones tienen como objetivos:

- Reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub>, los dos gases más nocivos. Exactamente, como se ve en la imagen 3, la Comisión Europea propuso reducir el límite de emisiones de coches y furgonetas para 2021 en un 15% desde 2025, y en un 30% desde 2030. El Parlamento y el Consejo, por su parte, acordaron objetivos más ambiciosos que el anterior: reducir un 37,5% las emisiones de CO<sub>2</sub> de los automóviles nuevos y un 31% las de las furgonetas en 2030.
- Consecuentemente, diseño de motores más económicos, como el uso de inyección a cargas parciales, o el llamado “downsizing”. Downsizing es la reducción de tamaño del motor a través de la carga de entrada está ganando impulso para reducir las emisiones del motor al tiempo que mantiene la potencia suficiente para la aceptación del cliente. Los motores pequeños de menor tamaño requieren un turbocompresor [9].

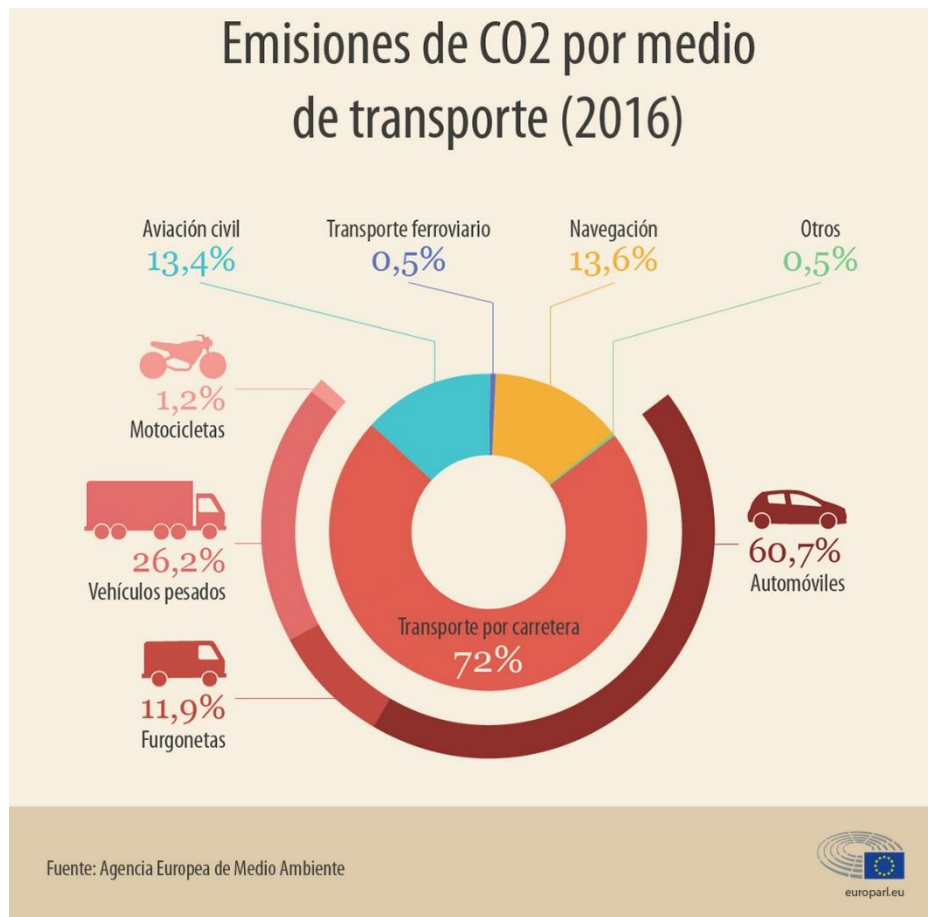
Las regulaciones en la comunidad europea se contemplan a través de las normativas euro. Se trata de un conjunto de directrices que los estados miembros deben de realizar y aplicar en los límites de las emisiones. Actualmente se está aplicando la Euro VI [10].

---

<sup>i</sup> **Downsizing**: Término anglosajón que hace referencia al campo de estudio de la reducción de cubicaje, cilindro y/o tamaño del motor manteniendo la misma potencia con el fin de que sea menos económico

---





3. Emisiones de CO2 originadas por el transporte en la Unión Europea UE (2016). Fuente: [11].

## 1.2. Situación actual de los sistemas de propulsión de los vehículos

En este apartado se van a describir en líneas generales los tipos de sistemas de motor que producen en la actualidad. Después se tratará en profundidad el motor de gasolina, siendo este el motor que se estudiará a lo largo del trabajo.

### 1.2.1. Motor de gasolina

Los motores de combustión interna alimentados con gasolina han dominado el mercado mundial de propulsión de vehículos desde el inicio del vehículo de motor [12] [13]. Este tipo de motor trabaja a volumen constante, y usa gasolinas de alto número de octanaje para evitar la detonación espontánea. La diferencia principal frente al Diesel es que este necesita de una energía a través de una bujía para iniciar la combustión controlada.

Hay una gran infraestructura de gasolina en todo el mundo, y una gran mayoría del público conoce y confía en el motor de gasolina [14]. Además, las nuevas tecnologías emergentes tanto a nivel de material como electrónico ofrecen una reducción de coste por producción.

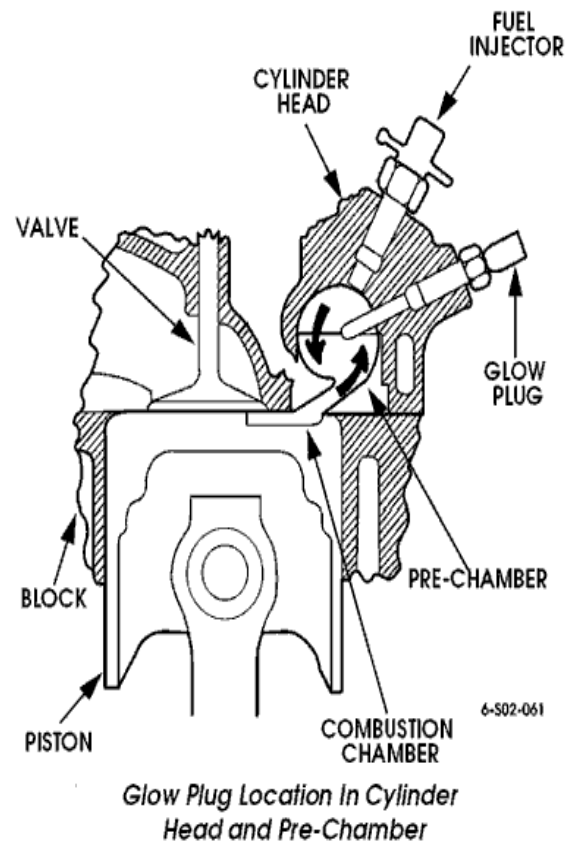
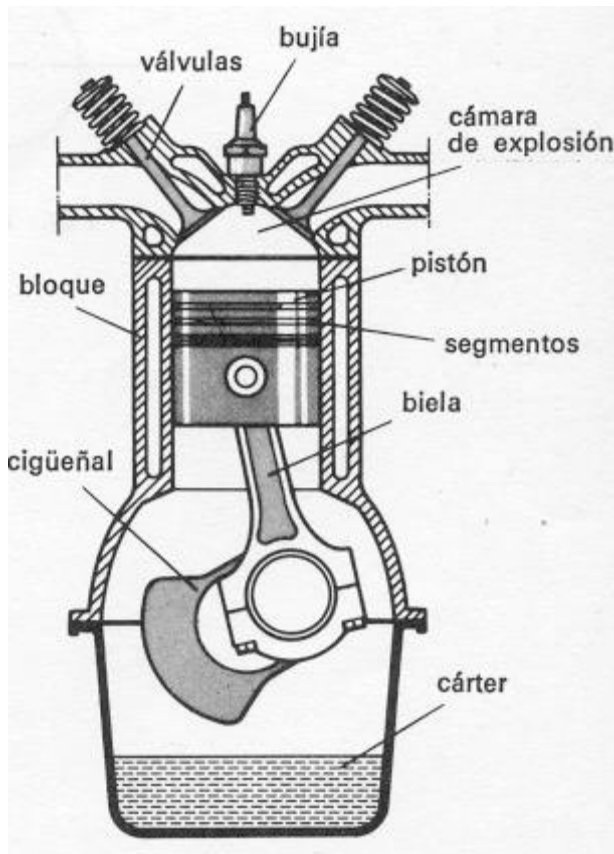
El uso que se le da a estos motores es principalmente como vehículo de turismo.

### **1.2.2. Motor Diesel**

Al igual que los motores de gasolina, los vehículos con motor Diesel han existido desde el inicio del vehículo de motor. Sin embargo, este tipo de motor tiene la gran ventaja de poseer un alto torque por giro del cigüeñal. El uso que se le da a estos motores es principalmente como vehículo de gran tonelaje.

Posee además un alto grado de compresión y no necesita una energía de ignición para empezar la combustión, de hecho, este tipo de motor tiene su principio en que el comburente, el motor Diesel usa aceites más densos y menos volátiles que la gasolina, comprime la mezcla de aire y Diesel a una alta presión y temperatura hasta inducir la autodetonación, por eso no se usan bujías. Otra principal diferencia es que trabaja, en el ciclo de combustión, a presión constante. En la figura 4 se puede ver la estructura de un motor Diesel.

Los costes por producción son más altos que los del motor de gasolina porque tienen que ser más robustos, es decir, aguantar relaciones de compresión más altas. Pero en los últimos tiempos, en Europa en particular, el número de automóviles de pasajeros que funcionan con motores Diesel ha crecido de tal manera que los motores Diesel ahora han superado a los motores de gasolina como el método de propulsión más común para automóviles de pasajeros en Europa [15]. Los automóviles con motor Diesel seguirán siendo comunes, y se espera que en el futuro cercano continúe creciendo en participación de mercado, hasta el momento en que la infraestructura, la experiencia y el deseo público de vehículos con motor alternativo puedan satisfacer la de los vehículos con motor de gasolina y Diesel [16].



4. Esquema de motor de gasolina (izquierda) y Esquema de motor de Diesel (derecha). Se puede apreciar la diferencia ya que el de gasolina utiliza la bujía y no tiene precámara y el Diesel no utiliza bujía, pero sí precámara. Fuente: [17][18].

### 1.2.3. Motor híbrido

El motor híbrido está en un desarrollo avanzado y las marcas de vehículos están cada vez más implantándolos en el mercado a pesar de su coste a día de hoy alto.

Este motor consiste en el uso de dos sistemas de propulsión, el primario es el motor de combustión y el secundario es el sistema eléctrico que complementa como fuente alternativa. se dividen en dos grupos:

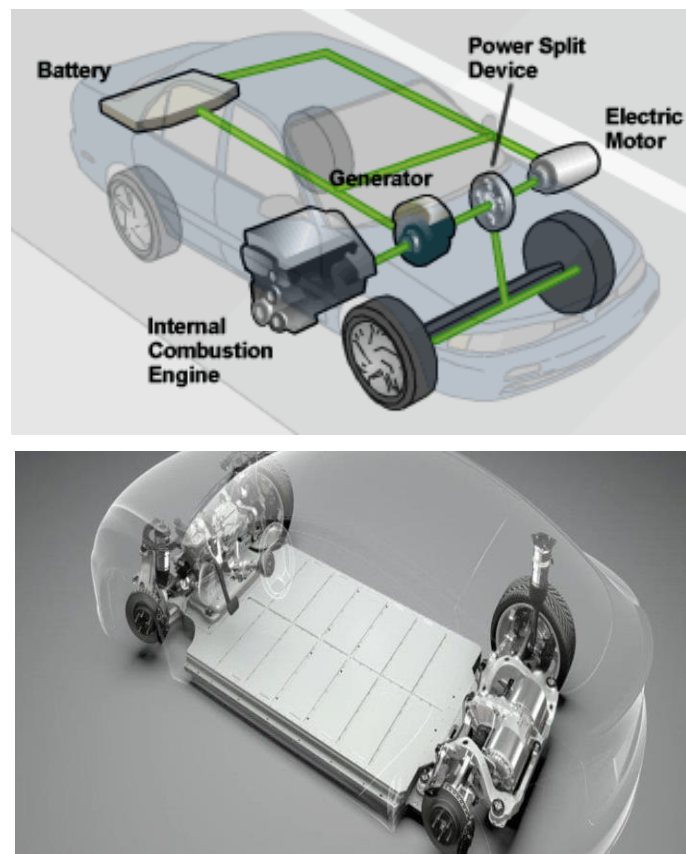
- En una serie híbrida, el motor está conectado a un generador que carga una batería. La energía de la batería se usa para conducir un motor, que a su vez alimenta el automóvil.
- En híbridos paralelos, tanto el motor eléctrico como el motor de combustión están conectados a la transmisión. La mayoría de los híbridos usan ruptura regenerativa, donde la energía cinética del vehículo se convierte en energía eléctrica a través del motor para cargar la batería [16].

Este motor se decanta entre los sustitutos a los de combustión, junto con el de pila y el eléctrico. La baja reducción de contaminantes y su gran autonomía, por el contrario del eléctrico, es probable que su implantación en los mercados sea definitiva.

#### 1.2.4. Baterías eléctricas

La batería eléctrica es el que más se encuentra en fase de desarrollo de todos. Aunque su invención es de principios del siglo pasado, no se le dio interés debido a la pobre tecnología para desarrollarlo en aquella época y no producía un beneficio económico como lo hace los combustibles fósiles. Ahora con las propuestas de reducción de emisiones se está empezando a investigar.

Las desventajas que presenta la batería son la autonomía corta en relación al motor de combustión y el tiempo de recarga alto frente al de combustión. Además, actualmente no se dispone de la infraestructura disponible para albergar este tipo de motores. Se puede ver en las imágenes 5 la localización de las baterías en un automóvil.



5. Esquema de motor híbrido (izquierda) y Esquema de batería eléctrica (derecha). Se puede apreciar la diferencia ya que el híbrido emplea un motor de combustión interna alternativo MCIA y el otro es 100% eléctrico. Fuente: [19].

### 1.2.5. Tabla comparativa y principales conclusiones

	Ventajas	Inconvenientes
<b>Motor Gasolina</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Infraestructura económica mundial ya consolidada.</li> <li>• Bajo coste/unidad.</li> <li>• Tipo motor más empleado y extendido.</li> <li>• Baja emisión de contaminantes.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Uso de energía extra para el inicio de la combustión como es la bujía.</li> <li>• Empleo de combustibles fósiles finitos.</li> </ul>
<b>Motor Diesel</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Infraestructura económica mundial ya consolidada.</li> <li>• Tipo motor más empleado y extendido.</li> <li>• No uso de bujías</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Empleo de combustibles fósiles finitos.</li> <li>• Alto coste/unidad.</li> <li>• Robusto y sonoro.</li> <li>• Alta emisión de contaminantes.</li> </ul>
<b>Motor Híbrido</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Baja emisión de contaminantes.</li> <li>• Fácil implementación en el mercado.</li> <li>• Gran autonomía</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• En desarrollo.</li> <li>• No se dispone de una infraestructura para su uso a nivel mundial.</li> </ul>
<b>Batería eléctrica</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Muy baja emisiones de contaminantes.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• En desarrollo.</li> <li>• No se dispone de una infraestructura para su uso a nivel mundial.</li> <li>• Alto coste/unidad.</li> <li>• Poca autonomía.</li> <li>• Falta de nuevas tecnologías.</li> </ul>

*1.1. Tabla comparativa de los principales motores descritos. Se compara las ventajas e inconvenientes de los motores. Fuente: Elaboración propia.*

Una vez visto todos los motores que se encuentran en el mercado, se han indicado las características especiales de cada uno, sus funciones y desarrollos, así como las ventajas y desventajas. Por una parte, la conclusión es clara, el motor más rentable desde todos los enfoques es el de combustión. Y es que la mayoría de las proyecciones del mercado muestran que el motor de combustión interna es la fuente de energía predominante para el transporte durante otros diez a veinte años. Hasta que la red se desplace significativamente a fuentes bajas de gases efecto invernadero, los análisis de vehículos eléctricos sobre ruedas no podrán ser mejores que los que utilizan motores de combustión interna [1].

Por otra parte, las baterías eléctricas también son contaminantes en diferentes ámbitos, como materiales con que son fabricados, transporte de energía. Los motores eléctricos

y las baterías no son nuevos, tampoco son limpios y, en general, no están libres de problemas [21]. Encontramos 2 principales problemas: la inmadurez tecnológica, y la gestión energética. Indagando en el problema de la inmadurez tecnológica, se remarcan 3 claras penalizaciones:

- El reabastecimiento del nivel de batería es inaceptablemente largo.
- La densidad de energía es inaceptablemente baja. Con autonomías reales por debajo de los 250 km en los utilitarios [22] y 300 km en vehículos SUV.
- La durabilidad de las baterías es limitada y menor que la vida útil del propio vehículo.

El segundo gran problema es que estamos hablando de masa, energía, potencia y el segundo principio de la termodinámica. La electricidad tiene que ser producida, mayoritariamente se hace a partir de fuentes de energía no renovables (con alrededor del 60% de pérdidas). Adicionalmente el transporte de la electricidad supone otro 20% de pérdidas. Desafortunadamente, las fuentes renovables suponen alrededor del 10% del mix energético mundial [23] y no tenemos pronóstico a medio plazo de que aumente significativamente[21]. Y añade más: Según un estudio del IFO alemán (Institute Centre for Economic Studies) realizado por el Prof. Dr. Hans-Werner Sinn donde se ha calculado que con el mix energético alemán un Tesla Clase 3 emite en su vida útil de 156 a 180 gCO<sub>2</sub>/km lo que supone entre un 11% y un 28% más que los modernos Diesel E6 [21] , es decir, Los nuevos Diésel E6 Temp emiten un 80% menos NO<sub>x</sub> de lo estipulado por la norma, según un estudio de la ADAC alemana [21] .

Por último, con las nuevas normativas europeas Euro V de restricciones para reducir emisiones de CO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub> en menos de un 30% para 2030 [11][24] y Euro VI para la reducción de partículas de hollín en los motores Diesel [10] los motores de gasolina están llamando la atención. El margen de mejora de los motores de gasolina es muy amplio todavía y las investigaciones en diseño conceptual y experimental como es el campo de estudio de la inyección directa (GDI) están aumentando la eficiencia.

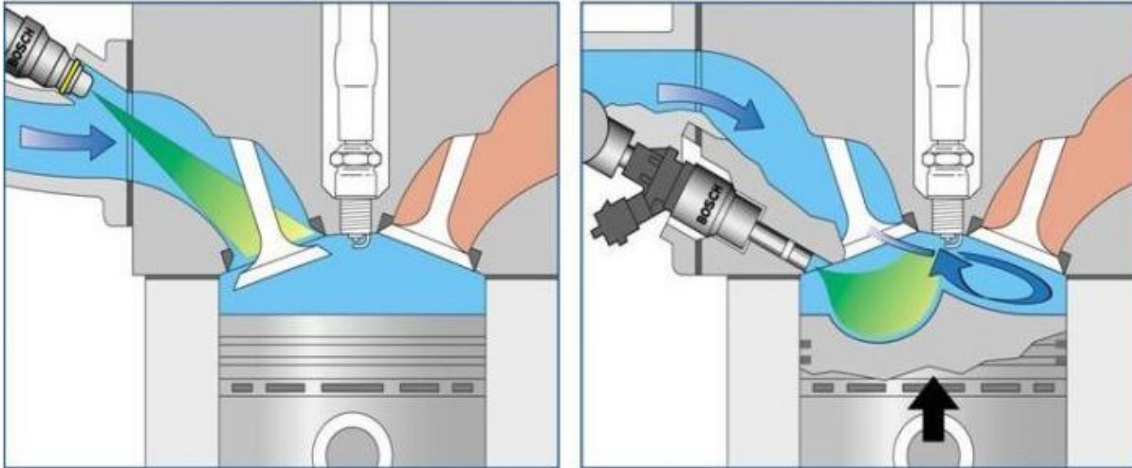
### **1.3. Sistema GDI versus sistema convencional PFI**

Como se discutió en la sección anterior, pese a las restricciones de los gobiernos los motores de gasolina van a continuar desempeñando un papel vital en el mercado para reducir sus emisiones y consumo de combustible [25].

Antes de la implantación actual del sistema de inyección directa GDI, los motores de gasolina utilizaban el sistema de inyección en el conducto de admisión o PFI, en la figura

6 se describe de forma visual la diferencia entre los dos métodos. Este sistema consistía básicamente en introducir el combustible aguas arriba de la válvula de admisión para que se mezclase con el aire antes de ser enviado a la cámara de combustión. Este sistema tenía problemas de mojado o impregnación en las paredes del conducto de admisión empeorando la mezcla. A carga alta trabajaba bien ya que, para llegar a funcionar cerca de las condiciones estequiométricas el inyector inyectaba más combustible evitando problemas transitorios de aceleración y deceleración[26], de lo contrario la bujía no podría encender la mezcla de aire / combustible dentro del cilindro. El problema aparece al trabajar a baja carga, en los instantes de aceleración, deceleración o ralentí. Un incremento del grado de admisión que, generalmente, viene acompañado de un aumento del número de revoluciones. Esto provoca la apertura de la mariposa, aumenta la presión de admisión y se deposita más combustible del que se evapora, empobreciéndose transitoriamente la mezcla hasta que se alcanza un nuevo estado de equilibrio, y el cierre de la mariposa conduce a un desequilibrio en sentido contrario. Esta estrategia no era la más idónea y sería preferible otro método para hacer funcionar el motor en un modo de combustión pobre que es el siguiente método [1] [27] [28].

En cuanto al sistema de inyección directa GDI, los primeros estudios datan de 1885 por el ingeniero Edward Butler. En 1903, los hermanos Wright emplearon esta técnica para sus primeros aviones siendo los primeros vehículos prácticos en usar dicho sistema. Mas tarde el GDI cayo en desuso debido a las limitaciones, el costo y la inflexibilidad de los sistemas. En 1996, Mitsubishi los reintrodujo, aprovechando el modo de estratificación para reducir las pérdidas volumétricas causadas por la válvula de mariposa, necesaria en los motores de gasolina. En los años siguientes, se aplicaron importantes esfuerzos de investigación y desarrollo para proporcionar nuevas generaciones de sistemas GDI[25]. Este sistema presenta la gran ventaja de que puede trabajar bien tanto a alta carga, funcionando como un PFI, como a baja carga del motor.



6. Sistema PFI (Izquierda) y Sistema GDI (Derecha.). Fuente: [29].

Sin embargo, hoy en día el sistema de inyección directa GDI sigue presentando inconvenientes y consecuencias negativas en el proceso de mezcla que se convierten en temas de estudio para los investigadores y que en este trabajo se van a tratar como son los efectos de *flash boiling*<sup>ii</sup> y *collapse*<sup>iii</sup>.

## 1.4. Objetivos y justificación del Trabajo

El presente trabajo se centra en la investigación de los efectos que provoca la inyección directa en la cámara de combustión en motores de gasolina inyección directa para mitigar y reducir los efectos de contaminación sobre el medio ambiente. Para abordar el trabajo se persiguen los siguientes objetivos.

- Indicar las partes y funcionamiento de un motor en general.
- Indicar y explicar el funcionamiento del sistema de inyección directa.

El estudio tiene una base experimental, se construye un banco de ensayos para las pruebas de investigación. Esta es la columna vertebral pues del trabajo, por tanto, es muy importante reflejar las partes y características de cada aparato, sistema y subsistema del banco de ensayos. Los objetivos en este aspecto son

- Explicar y describir los diferentes sistemas y subsistemas de que consta el banco de ensayos.
- Explicar también las distintas técnicas ópticas de captación de imagen

<sup>ii</sup> *Flash boiling*: Término Anglosajón que se traduce al castellano como punto de ebullición.

<sup>iii</sup> *Collapse*: Término Anglosajón que se traduce al castellano como colapso.



- Explicar cuál es la mejor configuración para lograr que los ensayos experimentales sean los más efectivos posibles.

En este trabajo además de una parte teórica y otra experimental como se acaba de describir, va a ser necesario un estudio analítico y práctico. Se van a emplear programas avanzados de softwares matemáticos que continuación se nombran y se marcan después los objetivos

Matlab®, propiedad de Matworks & Simulink®

Microsoft Excel®, propiedad de Microsoft®

- Explicar la metodología del procesado de imágenes
- Extraer y plotear los conjuntos de datos de los ensayos

La finalidad y justificación de este trabajo es averiguar qué procesos y fenómenos se van a producir en los experimentos del banco de ensayos evaluando ante diferentes condiciones de sometimiento. Los objetivos exactos son

- Averiguar con qué condiciones y cuando se producen los fenómenos de flash boiling y Spray Collapse.
- Averiguar se consecuencias conlleva que se produzcan dichos fenómenos en el proceso de atomización.

## 1.5. Esquema del Trabajo

El trabajo está organizado en 10 capítulos, empezando con una introducción donde se enfoca la idea general y se contextualiza el tema. El enfoque centra de la introducción es la vinculación directa que existe entre los motores actuales y el medio ambiente. Seguidamente se justifica el trabajo y se indican los objetivos.

En el **capítulo 2** se comentan los fundamentos físicos de manera teórica y la metodología. En ella, se escribe una breve reseña histórica, desde los arquetipos griegos pasando por la invención de la máquina de vapor hasta los últimos motores actuales. se explica después porque el sistema de inyección directa para motores de gasolina es más eficiente y tiene mejores prestaciones medioambientales. Se describe también las propiedades del combustible.

En el **capítulo 3**, siguiendo en la línea, se describen las características físicas del spray en campo lejano que se producen en el interior de la cámara de combustión cuando se inyecta y que fenómenos se producen: Flash boiling y Spray Collapse. Se explica la

interacción existente con el aire circundante de la cámara y como este afecta a la atomización.

En el **capítulo 4** se trata la metodología del ensayo experimental. Aquí se describen las partes que consta y la función de cada una. Se explica especialmente las tres técnicas de visualización óptica que se emplean, estas son: Técnica Schieleren, técnica DBI, Técnica MIE. De los ensayos de van a obtener las imágenes de inyección que son procesadas posteriormente.

En el **capítulo 5** se explican los resultados obtenidos mediante programas informáticas específicos de matemáticas. También se averigua los fenómenos de spray collapse y la raíz del surgimiento de dicho fenómeno anómalo.

En los **capítulos 6 7 8** se resumen las principales conclusiones que se han aportado y obtenido del trabajo experimental realizado, se indican las líneas futuras a proseguir para futuros trabajos. El capítulo 8 está dedicado a las referencias bibliográficas.

En los **capítulos 9 y 10** se detalla el pliego de condiciones y el presupuesto total del proyecto.

## 1.6. Softwares informáticos

A lo largo de este trabajo se van a recurrir a softwares avanzados que complementan a la tarea investigadora. A continuación, se indican que softwares se van a utilizar en función del campo que se emplee:

En el campo de extracción y obtención de resultados se emplea softwares matemáticos avanzados:

- Matlab®,
- Microsoft Excel®

En el campo de diseño para la construcción de planos y esquemas se emplea

- AutoCAD®

En el campo experimental de ensayos se van a utilizar softwares que gobiernan y controlan a los aparatos y equipos del banco de investigación.

- Fastcam®
- PFV®
- WinDiv®

También es necesario una regulación de los mismos, para eso se emplearán sensores que se comunican al software

- Pícolo®

En cuanto a la redacción, referencias bibliográficas y exposición del trabajo se van a emplear

- Microsoft Word
- Mendeley
- Microsoft PowerPoint



## Capítulo 2

---

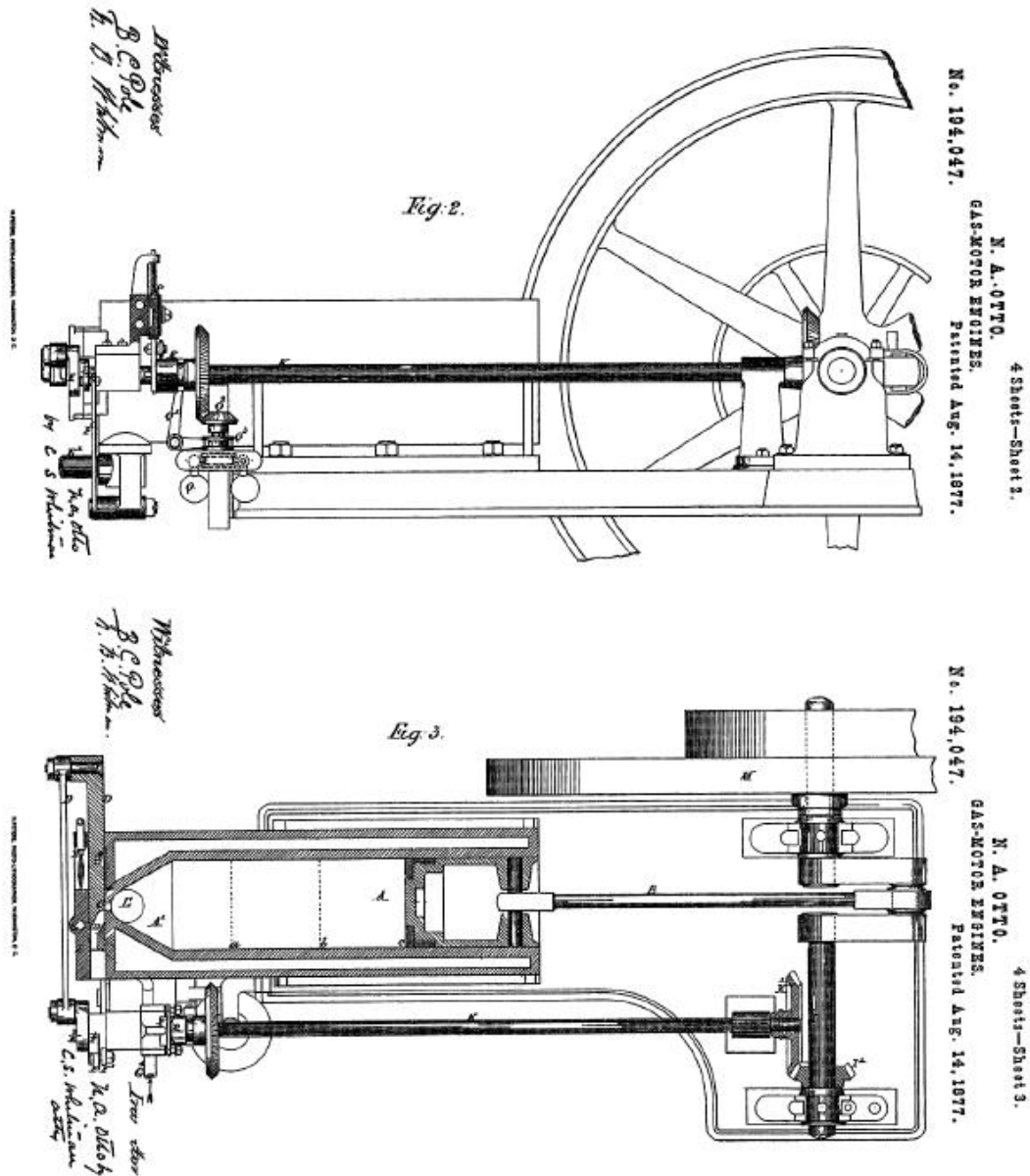
# **2. Fundamentos teóricos y metodología experimental de trabajo**

---

### **2.1. Introducción histórica**

Los motores de combustión interna actuales llevan más de dos siglos en continuo avance y desarrollo, aunque la invención original data de la época la Grecia antigua, hace más de 2000 años. A continuación, se van a indicar y comentar los hitos importantes en la historia de estos tipos de motores.

La fecha importante que marcaría un cambio en el campo de los motores es en el año 1876 cuando el ingeniero alemán Nicolaus Otto solicitó la patente titulada Gasmotor, figura 7. Este hito significó el nacimiento de los motores modernos actuales [26].



7. Dibujos de la patente del Motor de Gas de Nicolaus Otto. Se trata de los primeros bocetos del primer motor de combustión a volumen constante. Fuente [26].

Sin embargo, tal y como se ha comentado anteriormente, el motor de combustión interna no empieza en 1876. En la antigua Grecia Herón de Alejandría, considerado como uno de primeros ingenieros y gran inventor invento la primera máquina primitiva de vapor, figura 8. Utilizaba el vapor del agua como elemento para el movimiento giratorio parecido a un cigüeñal de la máquina.



8. Máquina de Herón de Alejandría. Año 120 a.C. Se considera la primera invención de máquina de vapor antigua y base fundamental de lo que se conoce hoy a la rama de la ciencia y de la ingeniería dedicada a turbo maquinaria. Fuente: [30].

En el siglo XV diversos intentos de usar los conocimientos dejados por los antiguos Griegos fueron condenados al fracaso (como el dispositivo que creo en español Blasco de Garay en 1543 para impulsar un barco), ya que el desarrollo de las turbomáquinas necesitaba de una base científica que no se disponía por aquel entonces [26].

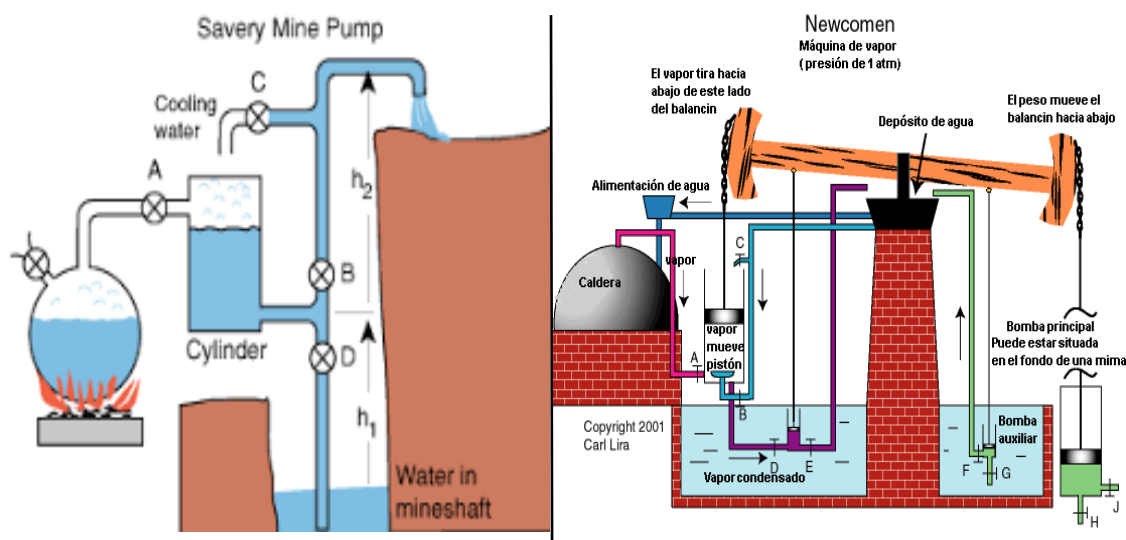
Los primeros antecedentes de las máquinas de desplazamiento positivo se remontan al siglo XVII y estaban basados en el funcionamiento del cañón. El científico de origen Holandés Christian Huygens construyo en 1673 un cilindro en el interior del cual se desplazaba un pistón accionado por los gases procedentes de una explosión de pólvora [31]. Cuando el pistón terminaba su carrera ascendente descubría unas lumbreras por las que se escapaban los gases calientes y al enfriarse el gas residual, la presión atmosférica, actuando sobre la cara opuesta del pistón, lo que empujaba hacia abajo. Este fue el primer avance en el uso de un fluido en estado gaseoso para el movimiento en una maquina térmica.

En 1711 el mecánico e inventor de procedencia inglesa Thomas Savery se le atribuye por ser el primero en desarrollar una máquina de vapor a nivel industrial, en este caso, para la industria minera. El artilugio consistía en elevar el agua de las minas de carbón por medio del fuego. Desde una caldera se llenaba de vapor un depósito, saliendo el aire sobrante a través de una válvula antirretorno. Posteriormente se cerraba la válvula. El vapor del depósito se enfriaba haciendo chorrear desde fuera de la misma agua fría, y al enfriarse, el vapor condensaba, haciendo el vacío en el depósito. Mediante una tubería y con vacío, se subía el agua llenándolo. Para vaciar el depósito se volvía a abrir

la válvula que lo conectaba con la caldera, y el vapor a presión hacía salir el agua por la misma válvula antirretorno que había salido el aire al principio [26].

El artilugio creado por Savery no alcanzó éxito por el motivo de su mal rendimiento y por cuestiones operativas ya que en la caldera se provocaban explosiones

Un año después, el herrero oficial de Thomas Savery, Thomas Newcomen, incluyó una gran mejora al invento de Savery. La máquina tenía un balancín (figura 9) que estaba unido por un extremo a la bomba, colocada en el pozo de drenaje de la mina y por el otro extremo el embolo de un cilindro movido por la acción del vapor generado en la caldera. La carrera de trabajo se realizaba durante el movimiento descendente del embolo, debido al vacío generado al condensar el vapor dentro del cilindro por mezcla con agua líquida. El movimiento ascendente tenía lugar gracias a la acción de un contrapeso. Además, la presión de vapor generada era más baja, lo que se corregía los problemas de la máquina de Savery. Esta mejora constituyó el primer paso de la denominada Primera Revolución Industrial [26].

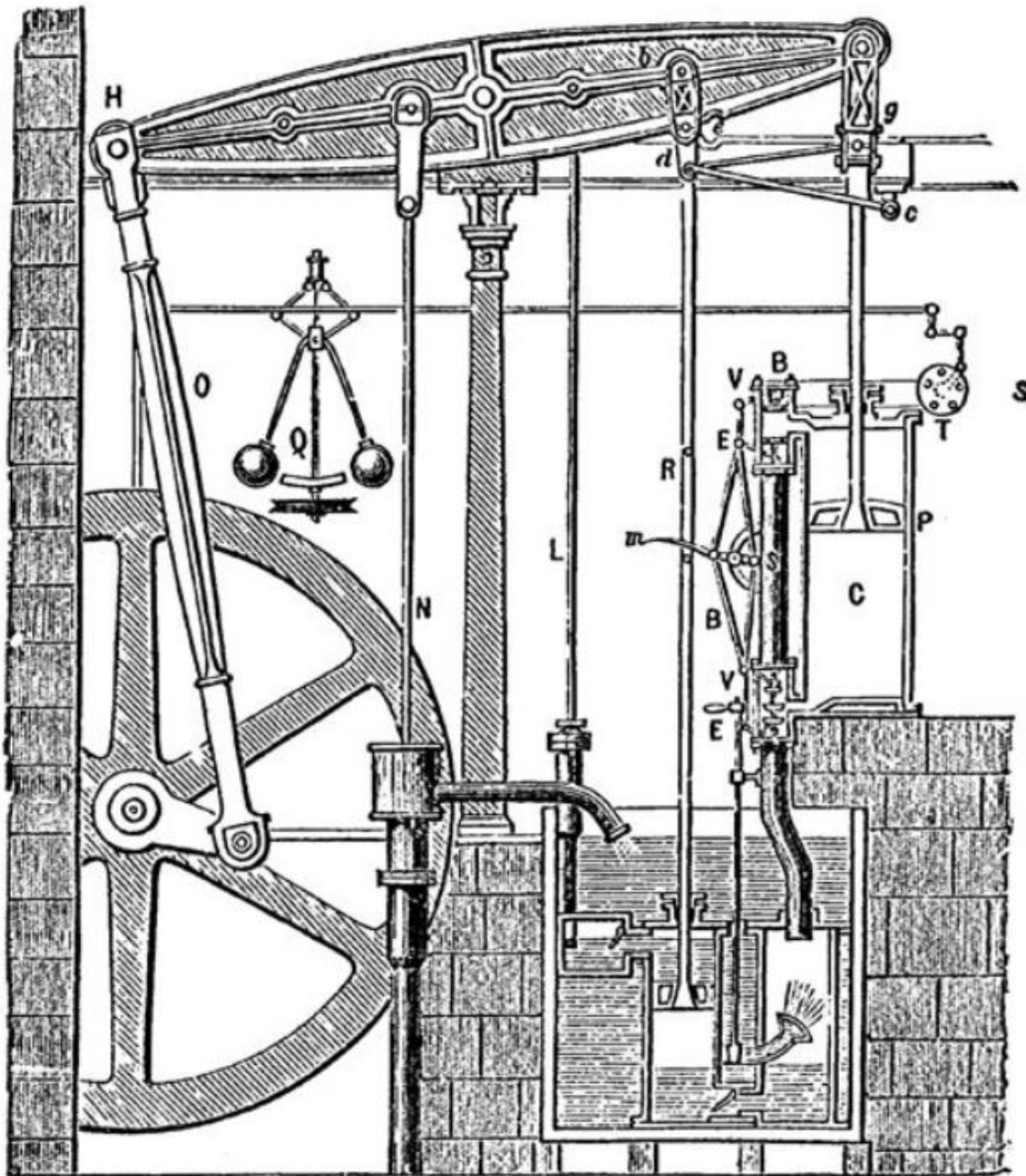


9. Máquinas de Savery (Izquierda) Año 1711 y Newcomen (Derecha) año 1712. Fuente:[31].

Y fue así porque en 1774 se pudo desarrollar la primera máquina de vapor a presión. El inventor fue el escocés James Watt y patentó su invento con el título "Un nuevo método para disminuir el consumo de vapor y de combustible en máquinas térmicas" en la imagen 10 se ve el grabado que patentó James Watt. Para el desarrollo se interesó en la tecnología de las anteriores máquinas de vapor diseñadas por sus coetáneos. Se dio cuenta de que todas las máquinas sufrían pérdidas de cantidad de energía al tener que enfriar y calentar el cilindro. Entonces enumeró una serie de mejoras como el condensador separado para evitar dichas pérdidas, y el cuadrilátero articulado para transmitir el movimiento desde el pistón gracias a la cual se duplicaba el número de



carreras de trabajo por unidad de tiempo. Estas mejoras incrementaron la potencia, el rendimiento térmico hasta el 4% y la rentabilidad y durabilidad.



10. Máquina de vapor de James Watt. Año 1774. Fuente:[31].

La máquina de Watt se considera la base de la revolución industrial, en cambio hará falta casi un siglo más para entender el proceso de un motor como tal desde muchos puntos de vista, mecánico, material, termodinámico y así poder ser denominado de combustión interna.

## 2.2. De la máquina de vapor externa al motor de combustión interna

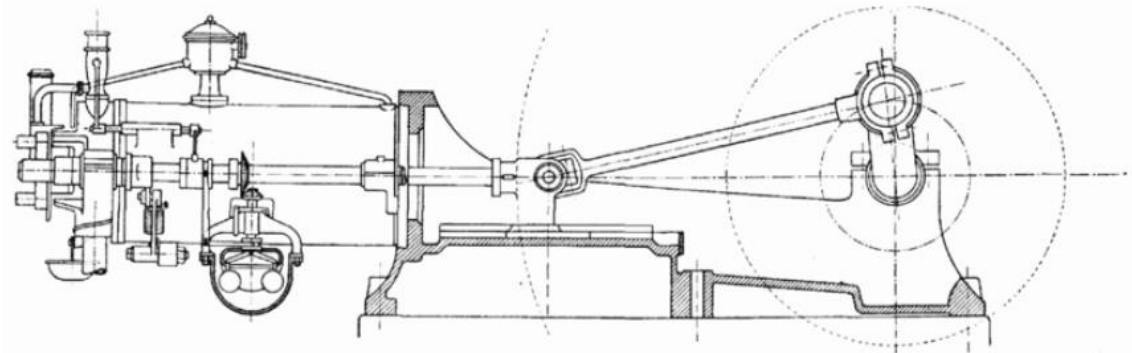
A principios de siglo XIX se produjeron varios importantes avances como en materiales, dispositivos mecánicos, pero no se tenía una idea clara de la naturaleza de los procesos que permitían la obtención de energía mecánica, que solo se comprendió, cuando se desarrolla la Termodinámica.

En 1824, el francés Nicolas Sadi Carnot comenzó con los primeros estudios sobre termodinámica y sentó las bases de una disciplina nueva. La motivación de Carnot era entender el funcionamiento de las máquinas de vapor y lo expresaba así:

De sus teorías se destaca en relación al tema de este trabajo, las posiciones de un pistón dentro de un cilindro. Con la obra de Carnot se abrieron las puertas para el desarrollo de los motores térmicos basado en el método científico.

En 1860, Jean Joseph Etienne Lenoir patentó el primer motor de combustión interna alternativo con éxito comercial. La patente se tituló Motor de aire dilatado con la combustión de los gases por medio de la electricidad. Y es que se puede ya denominar de combustión interna, por una parte, porque la generación de vapor y las etapas de compresión y expansión se hacían sin en un entorno externo como el de Newcomen o Watt, sino dentro ya de una cámara cilíndrica [30]. Por otra parte, también se puede denominar alternativo, ya que se alterna la admisión con el escape. El motor de Lenoir era muy ruidoso y con tendencia a sobrecalentar y a gripar si no se refrigeraba [26].

En 1862, El francés Alphonse Eugene Beau de Rochas, fue el primero en establecer como método clave la compresión de la carga en el cilindro antes de la combustión como se ve en la figura 11. También patentó el ciclo que más tarde utilizaría Otto para su motor, el ciclo de cuatro tiempos.



11. Grabado de la patente de la máquina de Alphonse Eugene Beau de Rochas (1862). Fue el primero en establecer como método clave la compresión de la carga en el cilindro antes de la combustión. Fuente: [30]

Este ciclo, consistía en un ciclo mecánico en el que el pistón recorre cuatro carreras y el cigüeñal dos vueltas a la vez. Esto significa que los motores de cuatro tiempos completan un ciclo cada dos revoluciones o dos giros del cigüeñal. El ciclo de Rochas es teórico y de volumen constante [26][30][30].

### **2.3. Motor de encendido provocado o motor Otto de 4 tiempos**

Nikolaus August Otto, ingeniero alemán nacido en colonia, antes de crear el motor se asoció en 1864 con Eugen Langen y fundaron la compañía Gasmotorenfabrik Deutz AG. Allí realizó notables estudios sobre el motor con gasolina hasta que en 1876 lo paso a la práctica con la construcción del primer motor de combustión interna alternativo y de 4 tiempos, comúnmente llamado motor Otto. Se comprobó que ofrecía buenos resultados, la eficiencia aumento respecto a sus predecesores. A si mismo tenía otras novedades como novedoso sistema de válvulas de admisión, el sistema de combustión se hacía con una bujía eléctrica y el empleo del carburador para preparar la mezcla. Aunque a lo largo de su vida hubo detractores y competidores por anular la patente, con el motor Otto se quedó como la base del motor de Gasolina que se emplea en la actualidad [26] [30].

#### **2.3.1. Ciclo Otto**

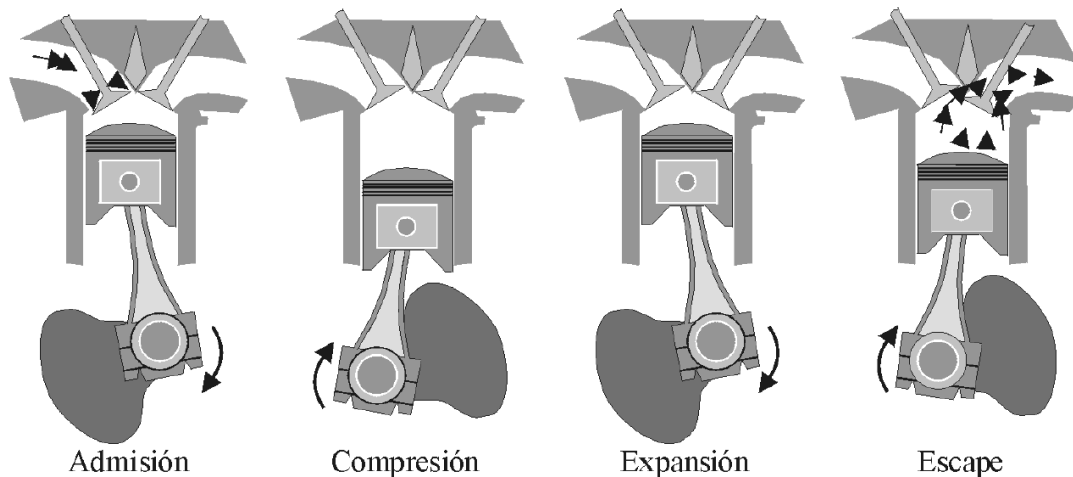
Se decretó el sistema de cuatro tiempos que se sigue usando en la actualidad. Entrando más en detalle en este asunto, se explica a continuación las 4 fases en detalle.

**Admisión (1º Carrera):** el pistón en la carrera hacia el punto muerto inferior o PMI crea una aspiración del fluido hacia el cilindro. En la cámara de combustión en el momento oportuno se abre la válvula de aspiración para permitir la entrada del aire o de la mezcla gaseosa del combustible. La válvula empieza a abrirse antes del inicio de la carrera y se cierra después de que la carrera se haya completado[32].

**Compresión (2º Carrera):** cerrada la válvula de admisión, durante la carrera de regreso del pistón la carga se comprime dentro de la cámara hasta un valor máximo que se alcanza en el punto muerto superior o PMS. En ese momento el volumen de la carga se ha reducido a una fracción de volumen[32].

**Combustión y expansión (3º Carrera):** Poco antes del fin de la carrera de compresión se produce el encendido de la mezcla por medio de una chispa eléctrica con el consiguiente aumento de temperatura y presión. Como consecuencia se desarrolla un elevado pico de calor. El valor de la presión es de 2 o 4 veces superior al del principio de la combustión. El pistón es empujado hacia el PMI y se comienza la expansión[32].

**Escape (4º Carrera):** en la carrera de regreso al PMS la válvula de salida de gases se abre y el pistón empujando expulsa los gases generados[32].



12. Fases de un motor de combustión interna de 4 tiempos. De izquierda a derecha: 1) Admisión, 2) Compresión, 3) Expansión, 4) Escape. Fuente:[26].

Al final de la carrera, se vuelve a cerrar la válvula la válvula de escape, mientras tanto se ha abierto de nuevo la válvula de admisión y comienza el ciclo de nuevo.

### 2.3.2. Componentes principales de un motor

A continuación, se indican los principales componentes o sistemas de un motor de gasolina:

- Cilindro o cámara de combustión
- Cigüeñal
- Válvulas de admisión y escape
- Bujía
- Sistema de lubricación
- Sistema de alimentación de combustible
- Sistema de refrigeración

## 2.4. Sistemas de inyección

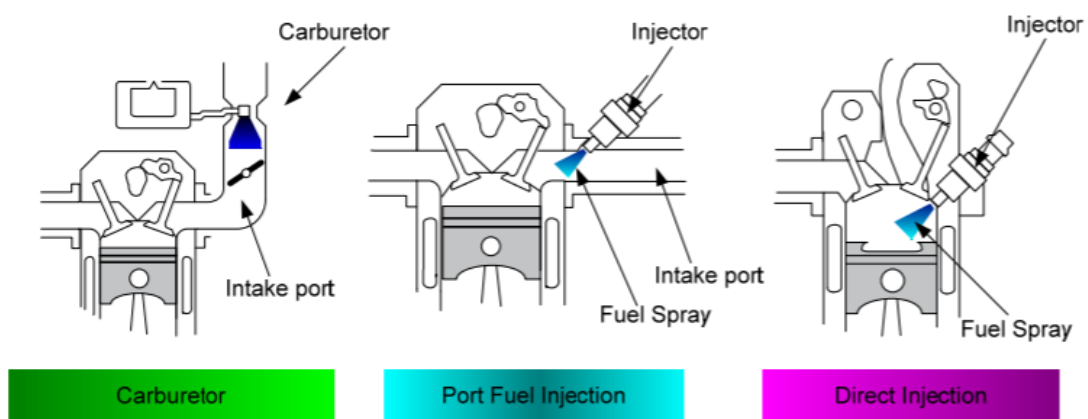
El tema de estudio de este trabajo se centra en el sistema de inyección. En este apartado se va a aportar información de los diferentes tipos de sistemas que han existido a lo largo de la historia del motor.

El sistema de inyección o de alimentación de combustible regula el dosado y la cantidad de mezcla admitida en función de los requerimientos del motor. En general, este sistema realiza las siguientes operaciones:

Medición de dos de las variables de operación que identifican el régimen del motor: régimen de giro (presión de admisión, masa de aire admitida por ciclo, gasto de aire, presión media efectiva, par motor) e introducción automática del combustible necesario para obtener el dosado óptimo.

### 2.4.1. Tipos de sistemas de inyección. Formación de mezcla aire-combustible

En este apartado se describen los diferentes tipos de sistemas de inyección que se han utilizado, figura 13. Se describe su uso, sus características principales e inconvenientes que tienen. Se empieza por el primero que se usó y se sigue en la línea histórica con los distintos otros tipos que han ido evolucionando hasta terminar con el que se va a usar para este estudio.



13. Evolución (de izquierda a derecha) de los sistemas de formación de mezclas en los motores de gasolina. Fuente: [33].

### 2.4.1.1. Carburador

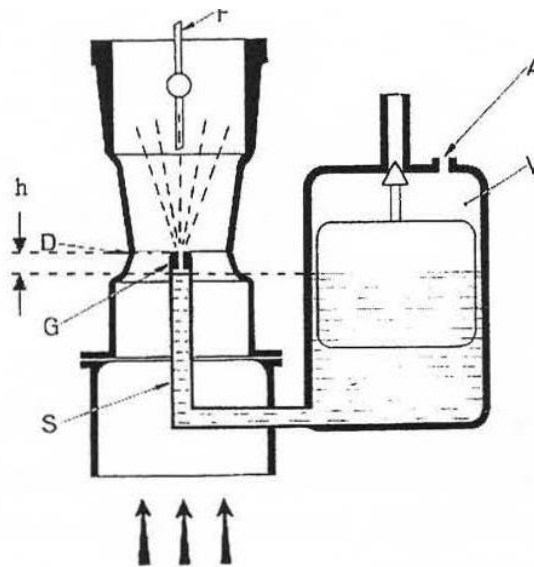
El sistema de alimentación por carburador es comúnmente llamado por depresión o aplicación práctica del efecto Venturi.

El dispositivo principal de este sistema es el propio carburador. De él depende la rapidez y precisión de la respuesta del motor a los mandos y a las exigencias del servicio [32].

El carburador se basa el principio físico de efecto Venturi. El efecto de venturi consiste en un tubo con un estrechamiento en el medio donde se origina una depresión al pasar el fluido por él. Entonces, la gasolina es introducida y mezclada con el aire que pasa por el conducto de admisión por el efecto venturi. Este sistema fue el primero en ser usado en los primeros motores hasta la introducción del sistema de inyección en la Segunda Guerra Mundial.

El carburador cumple con dos funciones:

- Dosificar la gasolina de modo que se obtenga el dosado deseado,
- Pulverizar la gasolina y mezclarla homogéneamente con el aire.



14. Esquema básico de un carburador elemental. En ella se aprecia. 1) Cuba; 2) Difusor; 3) Calibre; 4) Válvula. Fuente: [32]

Como se observa en la imagen 14, el carburador elemental tiene los siguientes componentes principales:

- **Cuba**, dotada de una válvula accionada por un flotador el objeto de mantener constante el nivel de combustible.

- **Canal de aire con un difusor**, este situado en la garganta, es decir, en la parte donde se estrecha el conducto.
- **Canal de suministro de combustible.**
- **Válvula de tipo mariposa**, al modificar la presión de admisión controla la masa de mezcla admitida por el motor. La válvula de mariposa se instala aguas abajo del aporte de combustible para que la regulación cuantitativa no afecte al dosado. Por otra parte, su eje de giro debe ser paralelo al eje del colector de admisión para evitar el reparto desigual de la mezcla.

#### 2.4.1.2. Inconvenientes del carburador elemental

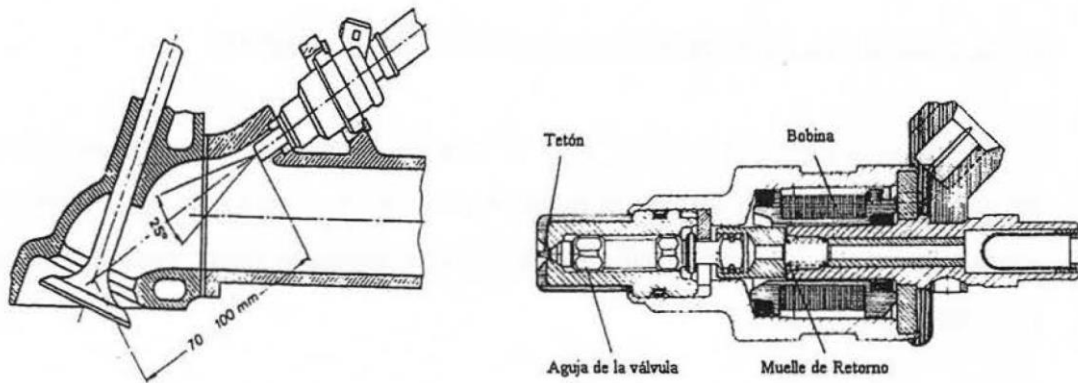
**Ralentí:** Cuando el motor funciona en ralentí, la depresión en la garganta del venturi es muy reducida y la mezcla tan pobre que imposibilita el funcionamiento. El problema se subsana mediante un segundo surtidor de combustible que desemboca aguas debajo de la mariposa de control de potencia. Dado que en ralentí la válvula de mariposa está casi cerrada, aguas abajo existe una fuerte depresión que succiona combustible a través del calibre de ralentí.

**Dosado óptimo:** En el carburador elemental la única variable de control es el gasto de aire; por ello, es imposible determinar un dosado óptimo en el dominio de operación del motor.

**Incremento del dosado con el gasto de aire:** El carburador elemental proporciona un dosado creciente con el gasto de aire. Ello es debido, por una parte, a la disminución de la función de compresibilidad y, de otra, a la variación de los coeficientes de descarga.

#### 2.4.2. Inyección por colector de admisión PFI

Los sistemas de inyección, empleados en los motores de mezcla homogénea convencionales, inyectan el combustible en el colector de admisión mediante sistemas multiorificio que utilizan un inyector por cilindro situado en las inmediaciones de la válvula de admisión, lo que permite variar la cantidad de combustible inyectado modificando la duración de la inyección. Los inyectores utilizados para PFI tienen considerablemente menos tiempo para proporcionar el combustible para mezclar con el aire, por lo que se utilizan válvulas de alta presión [1].

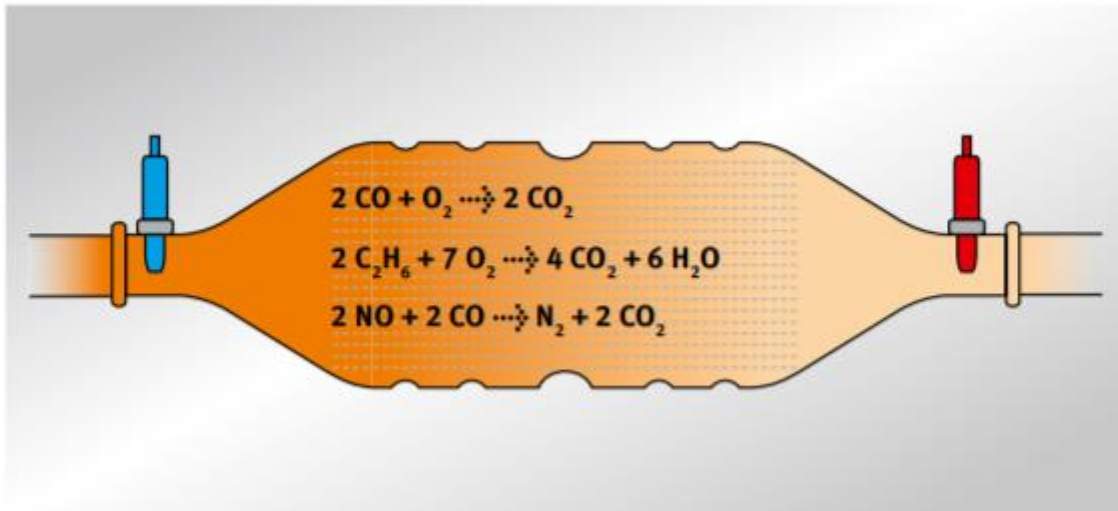


15. Sección longitudinal del sistema de inyección PFI. Fuente: [28]

Las principales ventajas de la inyección electrónica sobre los sistemas de carburación son:

- Control preciso del dosado óptimo en función de las condiciones de operación del motor medidas con sondas lambda. La sonda lambda es un sensor de control de emisiones situado en el colector de escape, permite evaluar el dosado de la mezcla a partir de la presión parcial de oxígeno. El principal objetivo del sensor lambda es reducir las emisiones de CO y NOx y lo hace midiendo el nivel de oxígeno residual que queda en los gases de escape después de la combustión. Transforma el nivel en una señal eléctrica que es enviada al ecu (Electronic control unit). Si la mezcla es pobre envía una señal al ecu para que aumente el tiempo de inyección y si la mezcla es rica disminuye el tiempo de inyección[28][34]. Esta corrección es importante ya que justifica la necesidad de introducir sistemas de inyección electrónica cuando hay catalizadores multifuncionales de escape tal y como se ve en la figura 16.





16. localización de la sonda lambda (azul) y sonda lambda "reguladora" (rojo). En medio el catalizador de partículas de tres vías. Fuente:[35].

La medición de la sonda lambda tiene una gran influencia en la calidad de la combustión y en la reducción de contaminantes, objetivo que se persigue en este trabajo.

- Este control automático se aplica también a los transitorios de arranque en frío y calentamiento.
- Minimización de la superficie mojada por el combustible con la consiguiente reducción de contaminación en deceleración y mayor reprise en aceleración. El sistema puede permitir cortar totalmente el suministro de combustible en deceleración con la consiguiente reducción de consumo y contaminación.
- Mejora de la distribución de combustible y aditivos antidetonantes entre los diversos cilindros, evitando el típico enriquecimiento de los cilindros próximos al carburador.
- Respuesta rápida a los cambios de posición de la mariposa de control, ya que se elimina la inercia del combustible.
- Posibilidad de diseñar con opciones para seleccionar operación en modo urbano y carretera.
- Adaptación de gran parte de los componentes a una amplia serie de motores con la consiguiente reducción del coste de fabricación.
- Posibilidad de aplicar gran parte de la tecnología desarrollada a sistemas de inyección directa y motores de mezcla estratificada.
- Incremento del par motor y reducción de consumo debido al incremento de rendimiento volumétrico [28].

### **2.4.3. Inyección directa GDI**

El sistema de inyección directa de gasolina GDI es el sistema que se utiliza en la actualidad y el que se va a utilizar para el estudio de este trabajo. Está basado en el concepto de inyectar combustible en el interior de la cámara en vez de introducirlo en el colector de admisión. Este concepto presenta algunos inconvenientes en comparación con la inyección por colector de admisión, pero sí que tiene potencialmente ventajas en relación con un menor consumo y una reducción de la formación de emisiones. Entre las dificultades inherentes a la inyección directas se encuentran:

- se requiere de una mayor presión de Inyección, puesto que el proceso va a disponer de menor tiempo para aportar el combustible requerido y además la presión en la cámara de combustión es mayor que en el colector.
- También la regulación es más compleja, puesto que los modos de funcionamiento, en particular la homogeneidad o no de la mezcla aire combustible, dependen del punto de funcionamiento del motor como el grado de carga y régimen de giro, además de otros aspectos como el propio encendido de la mezcla en condiciones de mezcla pobre [26].

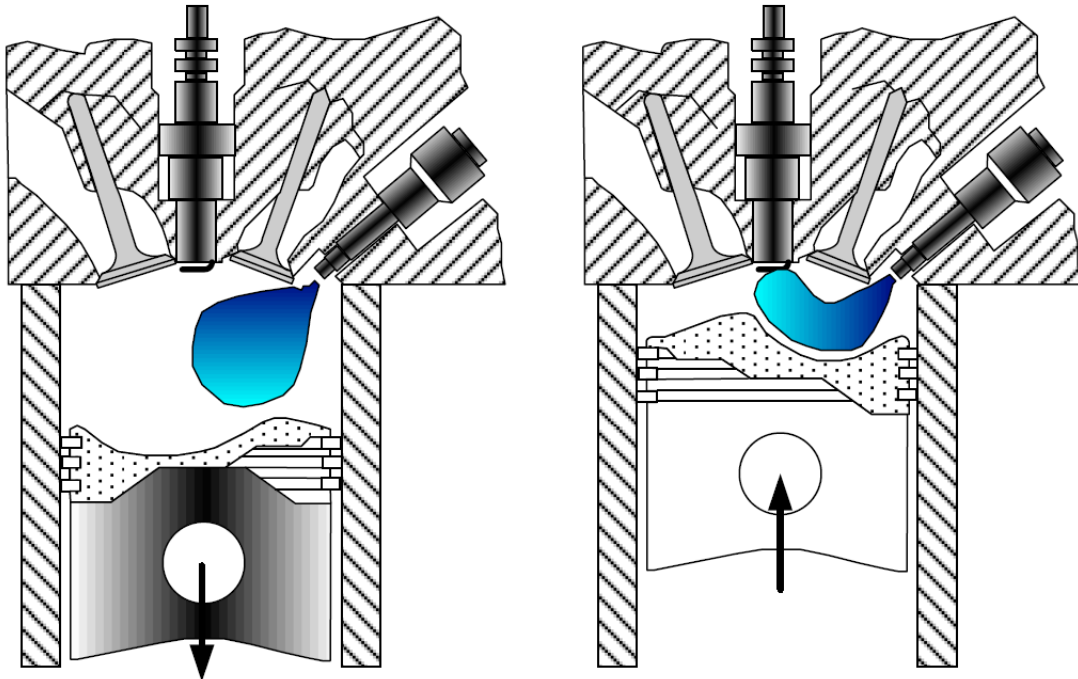
Existen dos, modos de funcionamiento principalmente, carga homogénea y carga estratificada.

#### **2.4.3.1. Carga estratificada**

Empezando por este último, la inyección se realiza durante la carrera de compresión (imagen 17), es decir, es de inyección tardía, de forma que la configuración del pistón, la culata y el propio inyector determina que el chorro de gotas de combustibles se dirija hacia los electrodos de la bujía. Este sistema tiene una buena respuesta en condiciones de baja carga ya que en este caso el motor funciona en condiciones de no estrangulación, esto es, dejar la admisión 100% abierta. La mezcla es por tanto pobre o cerca de la estequiométrica [36].

- El lado negativo es que en plena carga este sistema no aporta la mezcla suficiente para dar la potencia que se desea.
- El lado positivo es que se mejora la economía del motor

Cabe destacar que los tiempos para la evaporación de combustible y mezclado con el aire es mucho más reducido por lo que la mezcla no es uniforme, permitiendo que exista una región rica cerca de la bujía [33].



17. Modos de carga homogénea (Izquierda) y estratificada (Derecha). Fuente: [36].

#### 2.4.3.2. Carga homogénea

Para el caso de la carga homogénea, la inyección se realiza en la carrera de admisión, es decir es una inyección temprana. Existe un tiempo en el cual el combustible inyectado se evapora y se mezcla de forma homogénea con el aire. Este sistema trabaja mejor a plena carga como se ve en la imagen 18, es decir, sin estrangulamiento en la brida de admisión, de esta forma entra más aire a la cámara y el motor funciona bajo condiciones estequiométricas o ligeramente ricas [33].

- En el lado negativo, a carga parcial consume más combustible de lo que se desea,
- mientras que, por el lado positivo, la atomización y la mezcla alrededor de la cámara es eficiente, es decir, no existen problemas de película de combustible en las paredes de la cámara de combustión ni en los segmentos en la etapa de compresión.

Dicho proceso físico de evaporación depende de la volatilidad del combustible, tamaño de gotas inyectadas, temperatura de aire admitido u de la temperatura en la cámara de admisión.



18. Representación de los modos de carga para el sistema GDI en situación de plena carga para el caso de carga homogénea (Izquierda) y a carga parcial para carga estratificada (Derecha). Fuente: [37].

## 2.5. Inyector

En este apartado se va hablar del inyector como paso siguiente tras haber hablado del sistema en sí. Se describirá las partes de un inyector general. Luego de explicará los tipos de inyectores que existen y el que se usara en este estudio.

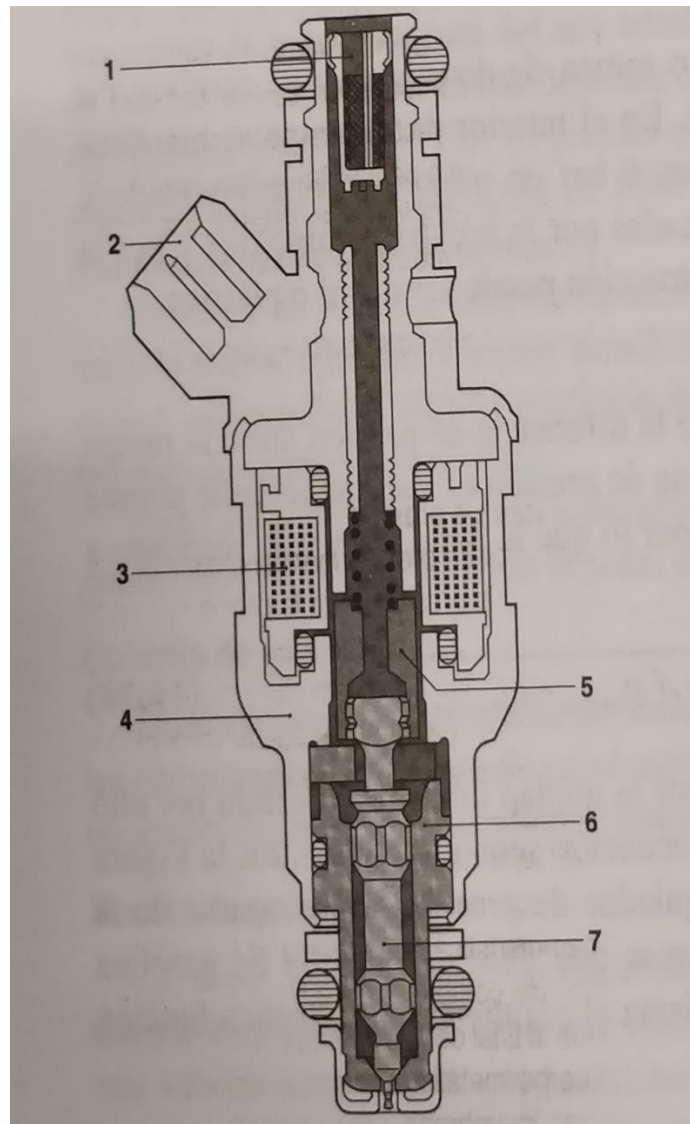
### 2.5.1. Partes de un inyector

El inyector, representado en la figura 19, es una válvula electromagnética. En un inyector el combustible que pasa por él se transforma de líquido a vapor en un breve espacio de tiempo, por lo que es una pieza fundamental para que la mezcla sea eficiente. Cuando el solenoide está desactivado el muelle mantiene cerrada la tobera de inyección y no se produce suministro de combustible [26]. las características principales son las siguientes

- La presión de inyección tiene que ser alta: El rango habitual de operación de los modernos inyectores GDI de 30 a 200 bar [38], pero se están estudiando e introduciendo presiones más altas [39] usó un inyector de combustible de 350 bar para disminuir las emisiones de partículas y descubrió que el mayor efecto

de aumentar la presión de inyección estaba en la formación de hollín. Husted y col. [40] analizaron los efectos del aumento de la presión de inyección en el consumo de combustible. Utilizaron un inyector de combustible de múltiples orificios de 400 bar y concluyeron que el aumento de la presión proporcionaría un ligero beneficio en el consumo de combustible [1].

- El tiempo de duración del chorro tiene que ser muy breve
- El inyector debe de resistir la temperatura elevada del interior de la cámara, por lo que la fabricación es necesariamente precisa, con tolerancias muy estrechas, y las piezas deben de ser robustas, relativamente pesadas, por tanto, el coste se ve incrementado [32].



19. Vista sección de un inyector de accionamiento electromagnético general. Se observan las siguientes partes enumeradas: Conducto de entrada con filtro (1), conector eléctrico (2), bobina electromagnética (3), cuerpo porta inyector (4), vástago magnético (5), cuerpo del inyector (6), aguja del inyector (7). Fuente: [26].

A continuación, se va indicar las partes de un inyector

- Conducto de entrada con filtro
- Conector eléctrico
- Bobina electromagnética.
- Cuerpo porta-inyector
- Vástago magnético
- Cuerpo del inyector
- Aguja del inyector

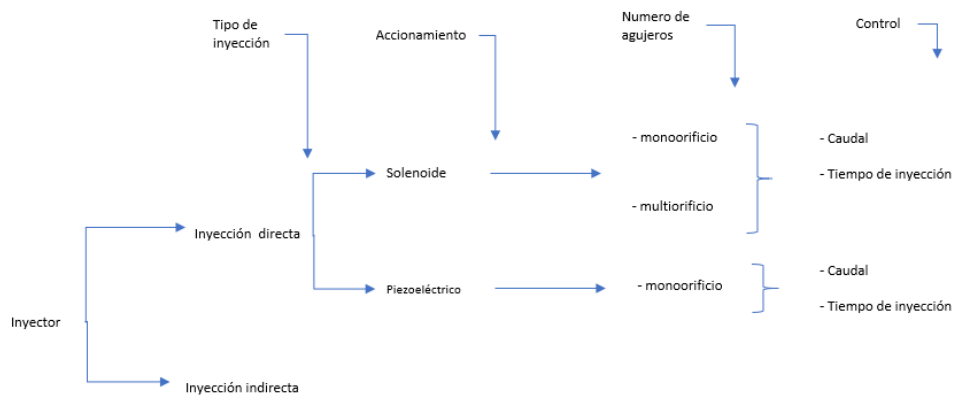
### **2.5.2. Tipos de inyectores de fuel para motores GDI**

Existen varios tipos de inyectores en el mercado, todos tienen la misma misión, vaporizar y mezclar el combustible eyectado eficaz, pero cada uno con un método diferente.

Para inyección directa a diferencia de la indirecta, el inyector debe de estar situado en el cilindro, por lo que las presiones de inyección deben de ser mayores. Según [16] las presiones habituales rondan entre 30 a 200 bar. Pero se han probado con presiones mayores de hasta 400 bar y se concluyó que el aumento de la presión proporciona un ligero beneficio en el consumo de combustible, aunque también se descubrió que el mayor efecto de aumentar la presión de inyección estaba en la formación de hollín. Entonces entra en juego la decisión de más presión a cambio de menos consumo y más hollín o baja presión y más consumo, pero menos hollín.

Otra forma de clasificación es si es monoorificio o multiorificio. En este aspecto, en la primera generación de inyectores se hicieron de un solo agujero, pero con el avance tecnológico la mayoría de inyectores son multiorificio porque mejora la atomización.

otra forma de clasificar es respecto al control sobre la cantidad de combustible que puede ser por caudal o por tiempo de inyección. A continuación, se ha elaborado un esquema aclarativo de las diferentes clasificaciones, imagen 20.



20. Clasificación de los tipos de inyector. Fuente: Elaboración propia.

También se tiene en cuenta la formación del spray, geometría de la cámara de combustión, movimiento y rozamiento con el aire, que se expondrá en la sección 3 del capítulo presente.

En esta sección se va a hablar de los tipos de inyectores de inyección directa que hay y de su método.

### 2.5.2.1. Inyector de accionamiento por solenoide multiorificio

Es tipo de inyector se caracteriza por tener un solenoide. El solenoide es un dispositivo electromagnético hecho de cobre que utiliza el campo magnético para mover la aguja metálica que lleva el inyector hacia adentro, cambiando así de un voltaje eléctrico en movimiento. Este control se hace para el tiempo de inyección. El funcionamiento es el siguiente:

Mientras no se cierre el circuito no se inyectará debido a que la aguja estará en su posición inicial. Tampoco se escapará nada de fuel debido a la presión que hace este sobre la aguja. En cuanto se cierra el circuito en el solenoide se crea el campo magnético que mueve la aguja hacia dentro del inyector dejando el espacio para que pueda salir el fuel por los agujeros. Este método es contrario al del piezoeléctrico que se verá más adelante.



21. Inyector tipo solenoide de estudio. imagen de perfil (izquierda), imagen de frontal donde se puede visualizar el número de agujeros (derecha). Fuente: Elaboración propia en el Centro de motores Térmicos (CMT).

Para este estudio de investigación se usa este tipo de inyector a continuación se indica las características principales del inyector a usar, así como su diseño tridimensional

---

### Geometría

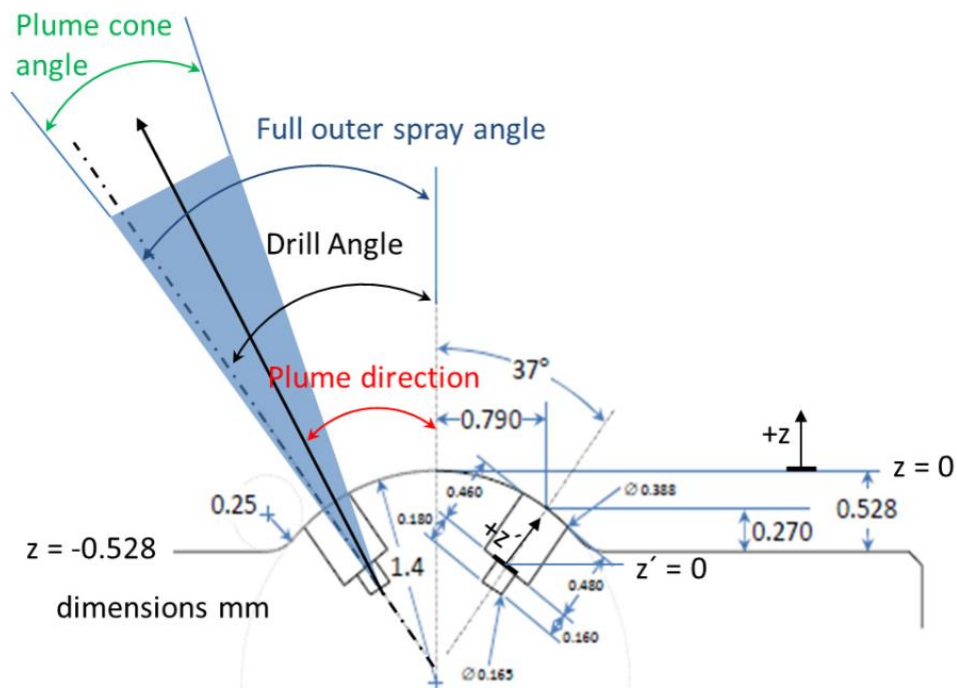
---

Número de agujeros	8
Forma de aerosol	circular
Ángulo de curvatura	0 °
Relación L / D	1.4
Forma del agujero	Derecho
Fabricación	EDM
Tasa de flujo	15 cc / s @ 10 MPa
Inyector de combustible	Delphi activado por solenoide
Tipo de boquilla	Orificio cubierto por válvula (VCO)
Forma de la boquilla	Agujero de paso
Diámetro del orificio	Especificación de 0,165 mm (0,170 mm medidos)
Longitud del orificio	0,16-0,18 mm
Diámetro del escalón	Especificación de 0.388 mm
Ángulo de perforación del orificio	37 ° con respecto al eje de la boquilla
Ángulo de atomización exterior completo	80 °

---

2.1. Descripción geométrica del tipo de inyector de estudio. Fuente: obtenido de [41].





22. diseño virtual de las toberas o agujeros de inyección. Fuente: obtenido de [42].

### Spray G condiciones de funcionamiento de ECN

Temperatura ambiente del gas	300 ° C (573 K)
Presión de gas ambiental <sup>a</sup>	cerca de 6.0 bar (600 kPa)
Densidad ambiental del gas <sup>a</sup>	3,5 kg / m <sup>3</sup>
Gas ambiente oxígeno (por volumen)	0% O <sub>2</sub> (sin reacción). (gases de referencia en cámaras de precombustión)
Velocidad del gas ambiente	Casi inactivo, menos de 1 m / s
Inyector de combustible	Delphi activado por solenoide
Boquilla	8 orificios (ver geometría detallada de la boquilla)
Presión de inyección de combustible	20 MPa (200 bar), antes del inicio de la inyección
Combustible	Isooctano
Temperatura del combustible en la boquilla <sup>b</sup>	363 K (90 ° C)
Masa de inyección	10 mg *
Duración de la inyección electrónica	680 μs
Duración real de la inyección	780 μs (ver la duración real de la inyección medida)

---

Levantamiento de aguja Datos de rayos X de Argonne  
medido

---

*2.2. Condiciones de funcionamiento del inyector de estudio. Fuente: [41].*

Como se puede observar en la imagen 21 derecha el número de agujeros del inyector es de 8 simétricos. La presión máxima de estudio es de 200 bar. Por tanto, el inyector para realizar un trabajo óptimo debe de atrasar la aguja que tapa las entradas venciendo 200 bar de presión. En la imagen 22 se describe de manera cuantitativa el diseño de las toberas. La dirección de la pluma de la tobera, el ángulo de cono y el ángulo de del final de cono hasta el eje axial del inyector, estos parámetros serán medidos consecuentemente en los ensayos.

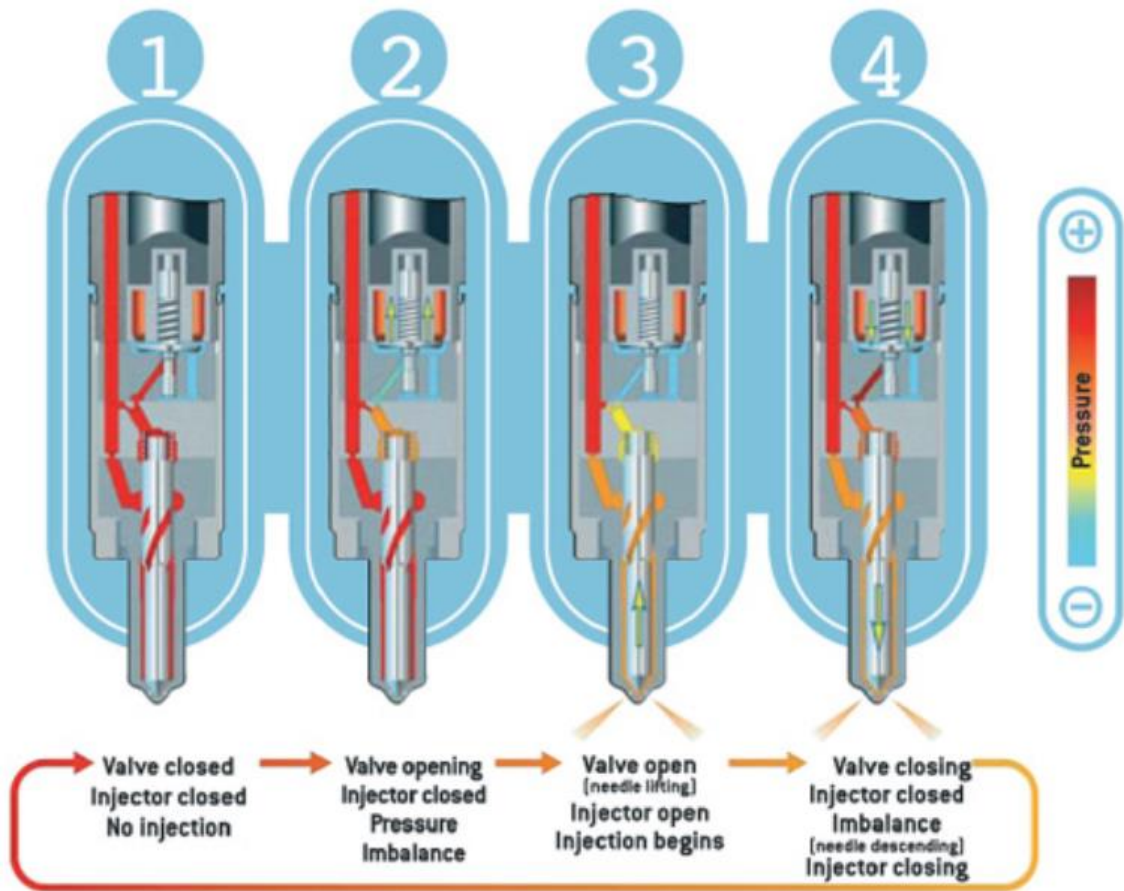
### **2.5.2.2. Inyector piezoeléctrico multiorificio**

Este tipo de inyector utiliza cristales piezoeléctricos como cuarzo o cerámicas técnicas y debe tener forma de disco. su funcionamiento se basa en el fenómeno piezoelectricidad, es someter al material a una tensión de tracción y compresión, en este caso a través de una diferencia de voltaje y/o potencia. Esta diferencia de voltaje se transforma en movimiento mecánico de desplazamiento para la aguja metálica

Mientras el circuito este cerrado la aguja se encuentra en su estado inicial. Cuando se abre el circuito, la diferencia de voltaje expande el material piezoeléctrico y hace que la aguja salga hacia afuera y siguiendo un desplazamiento de alejamiento respecto del propio inyector. Por último, al moverse deja un espacio por el que sale el fuel dirigido hacia el interior del cilindro.

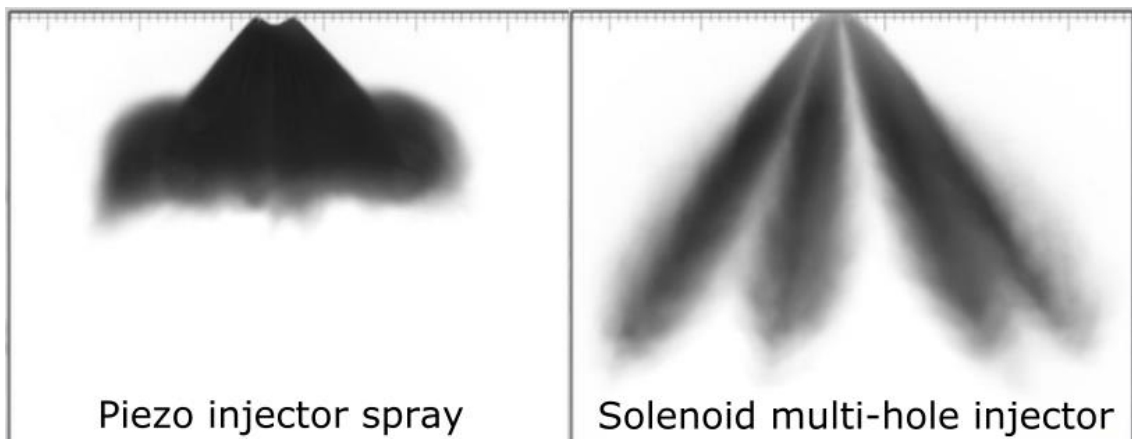
Los inyectores piezoeléctricos presentan una serie de ventajas. En cuanto a la presión de inyección son capaces de operar hasta 2000 bar. Respecto a los tiempos de inyección son bastante bajos, hasta 0,2 milisegundos lo que permite proporcionar cantidades muy pequeñas de combustible cuando sea necesario y los hace más adecuados para estrategias de inyección múltiple. También permiten varias inyecciones completamente dosificables en cada ciclo de trabajo. Todo ello redunda en una mayor capacidad de control sobre el proceso de inyección y una mejor optimización del combustible, lo que se traduce en el cumplimiento de las normas anti contaminación. Para una mejor descripción se puede observar la imagen 23.

El uso de inyectores piezoeléctricos también puede servir para disminuir la penetración y mejorar la mezcla de combustible, tal y como afirmó Mercedes en su tecnología BlueDirect [43].



23. Diagrama de proceso del inyector de combustible piezoeléctrico. Fuente: [44].

En la imagen 24 se observa una simulación de la diferencia de sprays entre los inyectores piezoeléctrico y de tipo solenoide siendo este el más eficaz porque es de tipo multiorificio, que como se ha comentado y se puede visualizar, el spray penetra más y se expande mejor con ángulos entre espigas opuestas de hasta 140°.



24. salidas de spray de los dos tipos de inyector, inyector piezoeléctrico (izquierda), inyector solenoide (derecha). Fuente: [16].

## **2.6. Combustibles**

En este apartado se describe las funciones básicas del combustible en general. Luego se determina las características y propiedades que tienen los combustibles. Por último, se explicará de manera más específica qué tipo de combustibles se van a utilizar en este estudio. Es muy importante precisar, de toda la información comentada más adelante la presión de saturación es la propiedad sumamente importante en esta investigación.

### **2.6.1. Funciones del combustible**

El motor no existiría como tal si no hubiera combustible. El combustible es vital y es la última pieza que queda para completar el complejo sistema de que se compone el motor. El combustible es aquella materia en estado sólido, líquido o gaseoso que libera energía a partir de un iniciador. Esa energía se libera en forma de calor para después transformarse en energía mecánica [45].

Por otra parte, la función secundaria del combustible es de refrigerar el aceite caliente. Este proceso, aunque no deja de ser importante para el motor, es un tema amplio que abarca un gran estudio de investigación, no es primordial para el estudio de este trabajo y por tanto no se puede describir en este trabajo. Sin embargo, se anima al lector si lo desea a seguir profundizando el tema de la refrigeración de motores.

### **2.6.2. Propiedades del combustible**

Las propiedades del combustible condicionan el diseño del sistema de combustible y el control del motor. En general, el combustible presenta las siguientes propiedades

- Ser bombeable y fluir de modo sencillo bajo toda condición de operación.
- Permitir la puesta en marcha del motor bajo toda condición y proporcionar condiciones óptimas de dosado.
- Permitir la obtención de una combustión eficiente
- Poseer alto poder calorífico.
- Minimizar los posibles efectos dañinos sobre el sistema de combustión
- Minimizar también la corrosión sobre los distintos componentes del sistema de combustible y riesgo de encendido.

➤ **Índice de octano**

Se define como la resistencia a la detonación. Se referencia a una mezcla isoootano e isoheptano. Cuando un combustible posee la misma presión crítica que una mezcla de referencia de estos dos compuestos se dice que su índice de octano es el porcentaje de isoootano en dicha mezcla. También se pueden añadir compuestos para aumentar el índice de octano de un combustible [45].

➤ **Punto de congelación**

En un determinado combustible previamente enfriado para formar cristales de cera, se define como la temperatura a la que se fundiría el último cristal. Dado que se ha de garantizar el flujo ininterrumpido de combustible desde los tanques de combustible hasta el motor, así como la capacidad lubricante, la temperatura del combustible se ha de mantener por encima del punto de congelación [45].

➤ **Viscosidad**

Los combustibles poseen un cierto grado de viscosidad, lo que permite utilizarlos también como lubricantes. Uso como lubricante y refrigerante de partes móviles en las bombas, válvulas y sistemas de medida. La desventaja de una elevada viscosidad es la capacidad para retener contaminantes en suspensión, lo que conduce a la necesidad de filtrado del combustible [45].

➤ **Volatilidad**

Se refiere a la tendencia a la evaporación. Una elevada volatilidad es ventajosa durante la puesta en marcha en condiciones muy frías o durante reencendidos en vuelo. Baja presión a la entrada de la bomba de combustible puede dar lugar a la vaporización. Se producen dos fenómenos.

- Vapor lock, bloquea el paso de combustible.

- Cavitación, en la aparición de burbujas de vapor que vuelven a fase líquida al incrementarse la presión, pudiendo dañar permanentemente los componentes de la bomba.

La volatilidad es importante en este estudio porque favorece la mezcla es por eso que se aportara un apartado más técnico para hablar de ello [45].

### ➤ Limpieza

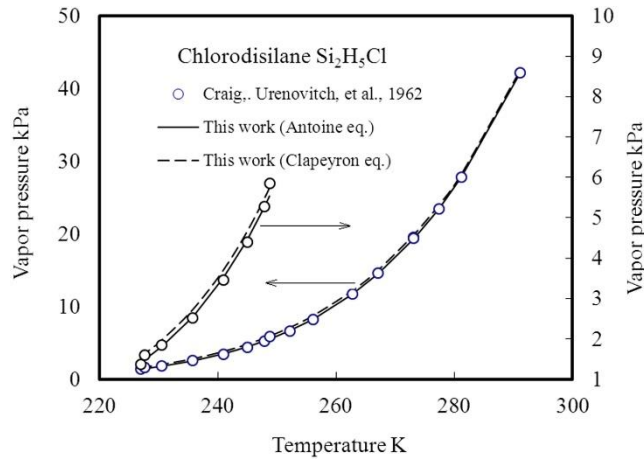
Se refiere a la ausencia de contaminantes, en sus diversas formas. LA viscosidad y densidad cercanas a las del agua proporciona al combustible la tendencia a contener contaminantes en suspensión que han de ser filtrados. La congelación del agua puede dar lugar a la formación de cristales que bloqueen los filtros de combustible: anticongelante. A su vez la presencia del agua promueve la corrosión y la generación de microorganismos: bioácidos [45].

### **2.6.3. Presión de vapor. Características de los combustibles de estudio**

En este apartado se habla de la presión de vapor. Después se va a comentar brevemente los puntos principales que tiene cada combustible de estudio

Una sustancia que está en estado líquido tiene una energía cinética suficiente para que sus moléculas que lo componen se muevan más allá de ellas. Si se supone que dicha sustancia esta confinada en un flujo, se mueve en esa dirección. Las moléculas tienen lazos entre ellas que hacen que estén cerca las una de las otras. En la superficie de la sustancia, las moléculas de primera línea al no tener todo el enlace completo, estas tienden a liberarse más fácilmente debido a la energía cinética media ya que sus enlaces se debilitan y por tanto a evaporarse. A medida que se aumenta el calor, es decir, la temperatura media cinética, las moléculas se debilitan más hasta romperse entre ellas, la sustancia desfragmentada queda engloba en el flujo [46].

Por tanto, se define la presión de vapor de un líquido como la presión de equilibrio de un vapor por encima de su líquido, es decir, la presión del vapor resultante de la evaporación de un líquido en un recipiente cerrado [45]. La presión de vapor de un líquido varía con su temperatura, como se muestran en los dos siguientes gráficos ejemplificativos 25, 26.



25. Grafica Comparativa y ejemplificativa de la presión de vapor de la sustancia chlorodisilane y chloride. Se muestra como aumenta la presión a medida que aumenta la temperatura. Eje y de la izquierda representa la escala del compuesto Chlorodisilane, en el eje de la derecha del compuesto Chloride. Fuente: [47].

En 1888, El químico francés Antoine de Chandieu extrajo de sus investigaciones con una serie de datos de presión de vapor observados de una sustancia muestra una relación lineal entre el logaritmo de la presión de vapor medida y el valor recíproco de su temperatura absoluta, una formula (1) semiempírica [46][47].

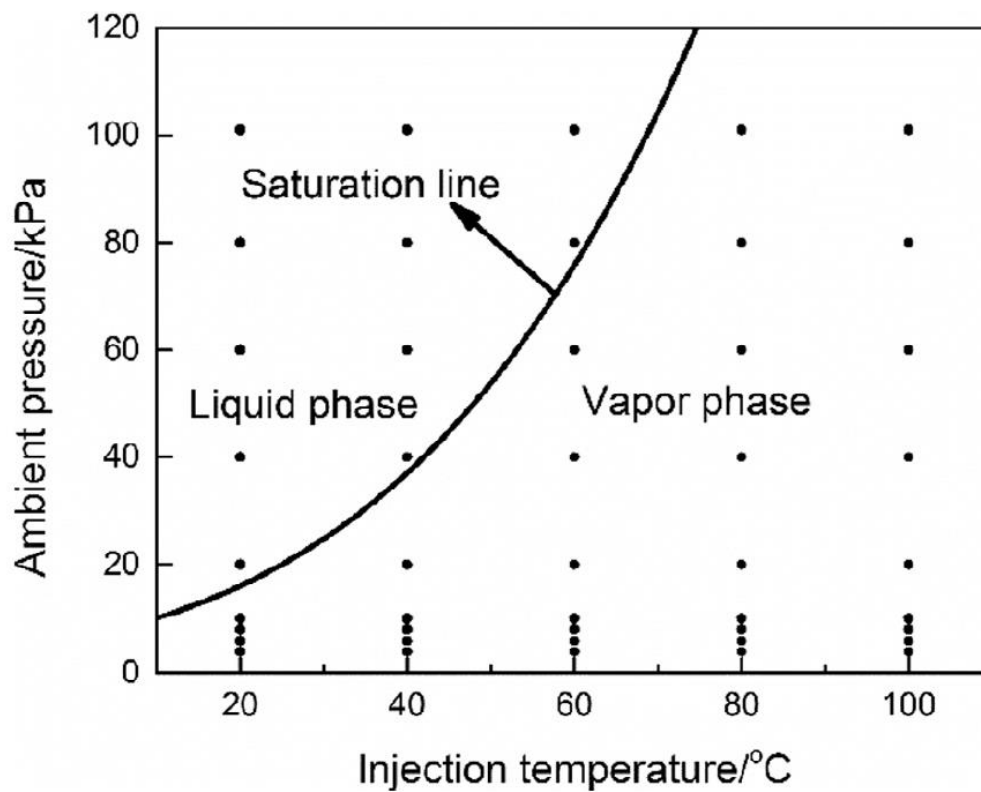
$$\log_{10} P = A - \left( \frac{B}{T + C} \right) \quad (1)$$

En el que,

P es presión (mmHg)

A, B y C son constantes tabuladas en función del compuesto (-)

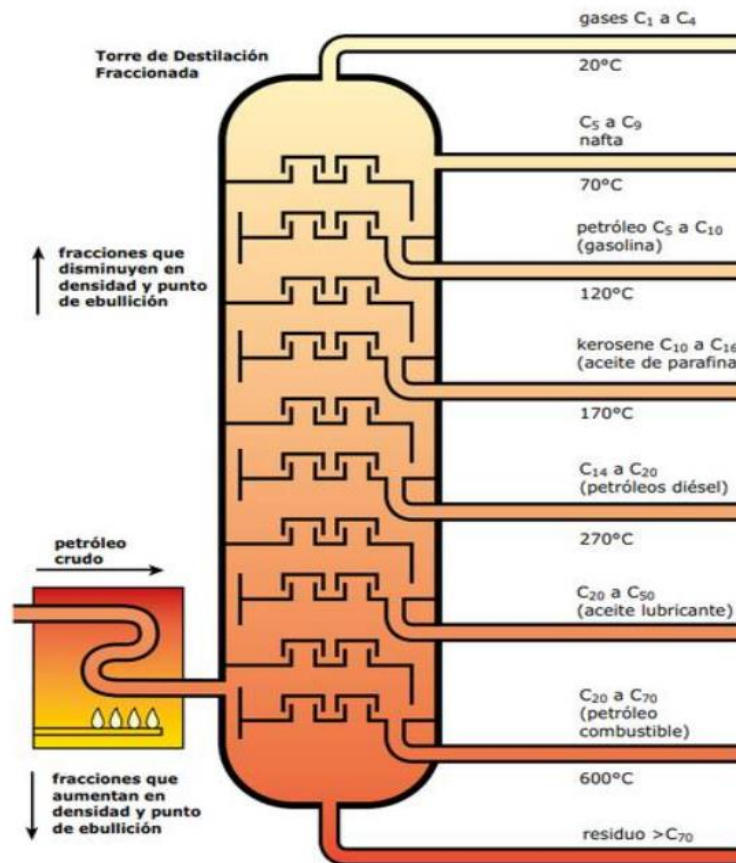
T es temperatura (°C)



26. Descripción grafica general de las fases vapor y liquido de un compuesto en función de presión y temperatura. También se observa la línea de presión de vapor. Fuente: [48].

En todo este estudio se van a utilizar diferentes tipos de combustibles. Todos ellos tienen en común su procedencia, de la destilación fraccionada del petróleo. La destilación fraccionada es un proceso de calentamiento del petróleo mediante el cual se van extrayendo derivados de este, de los más simples como hidrocarburos ligeros hasta los más pesados o crudo donde se alcanzan temperaturas de más 400°. Este procedimiento se realiza en las torres de destilación de las refinerías (imagen 27).





27. esquema de torre de destilación. se observa a medida aumentan la temperatura se van separando los diferentes enlaces del petróleo. También se observa la gasolina se encuentra es el segundo escalón empezando por arriba lo que indica que sus enlaces son débiles. Fuente: [49].

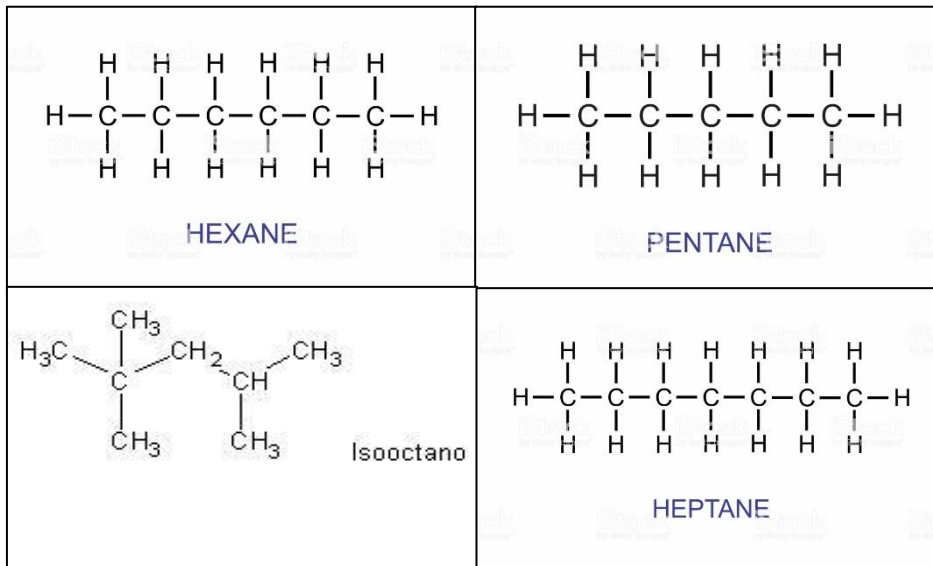
En el caso de las gasolinas, se encuentran en un escalón encima de los hidrocarburos ligeros ya que el grupo de átomos que lo componen esta entre 5 y 12 átomos. Son por tanto las gasolinas hidrocarburos aromáticos y de enlace débil ya que el proceso de evaporación es en condiciones ambiente.

Otro factor clave de estos hidrocarburos son sus índices de octanaje que ya se ha explicado en Propiedades del combustible. ahora se puede ahondar más en esta materia y diferenciar entre MON y ROM. A continuación, se explicará de forma breve.

- **ROM:** (Numero de octano de investigación) tipo de medida de índice de octanaje que describe el comportamiento de la gasolina ante ciertas condiciones en motor como bajas temperaturas.
- **MON:** (Numero de octano de motor) tipo de medida de índice de octanaje que describe el comportamiento de la gasolina ante ciertas condiciones en motor. Para el MON las condiciones son más severas. El MON suele tener 10 puntos

menos de octanaje que el RON, resultando ser una variable importante para el motor.

Dentro de la familia de las gasolinas hay diferentes subtipos con diferentes combustibles. En este estudio se van a experimentar con aquellos que son más utilizados y se van a indicar con la imagen 28 las diferencias de cada una de ellas.



28. composición química de los diferentes tipos de combustibles de estudio experimental. Hexano (Izquierda superior), Pentano (Derecha inferior), Isooctano (Izquierda inferior), Heptano (Derecha inferior). Fuente: Internet.

- **Isooctano:** es un alcano ramificado con una cadena principal de pentano y tres radicales metilos unidos.
- **n-heptano:** alcano simple de 7 carbonos. Es el punto cero del octanaje por su pureza y tiene muchas variantes. Es altamente explosivo.
- **Hexano:** alcano simple de 6 carbonos y toxico
- **Pentano:** alcano simple de 5 carbonos y es toxico.

<b>Fuel</b>	<b>Densidad (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Presión vapor (Kpa) (300 K)</b>	<b>Temperatura autoignición (K)</b>	<b>Viscosidad cinemática (mm<sup>2</sup>/s)</b>	<b>Tensión superficial (mN/m)</b>
<b>Isooctano</b>	690	7.18	690	0.720	18.77
<b>n-heptano</b>	685	4.60	540	0.408	19.66
<b>Hexano</b>	654	22.03	507	0.294	17.78
<b>Pentano</b>	630	57.00	470	0.240	15.49

*2.3 . características físicas de los diferentes tipos combustibles de estudio experimental. Los datos extraídos están referenciados a temperatura ambiente (300K). Fuente: [50][51][52][53].*



## Capítulo 3

---

# 3. Caracterización del spray en el campo lejano

---

En este capítulo está dedicado a la salida del combustible del inyector. Es un proceso complejo en el que el chorro de salida debe de pulverizarse y pasar de estado líquido a estado cuasi-vaporizado quedando una mezcla gaseosa de micro pequeñas gotas de combustible.

Para entender la eficiencia del inyector se va a caracterizar de manera cualitativa la morfología y la geometría del chorro de salida tanto espacial como temporalmente, así como la calidad con el medio en el que se inyecte y el potencial para que se produzca el siguiente proceso como es la combustión.

Se van a identificar los mecanismos básicos de atomización dentro del chorro líquido, se cuantificará la transferencia de cantidad de movimiento entre la fase líquida y la gaseosa del chorro.

Por último, y no menos importante se realizará una descripción de la interacción entre el aire – combustible, y las ratios de cantidad movimiento del aire dentro del cilindro simulado de manera cuantificada. En este aspecto, la estructura del flujo turbulento desempeña un papel fundamental en la preparación de la mezcla. Se consideran tres tipos de movimientos de aire dentro del cilindro:

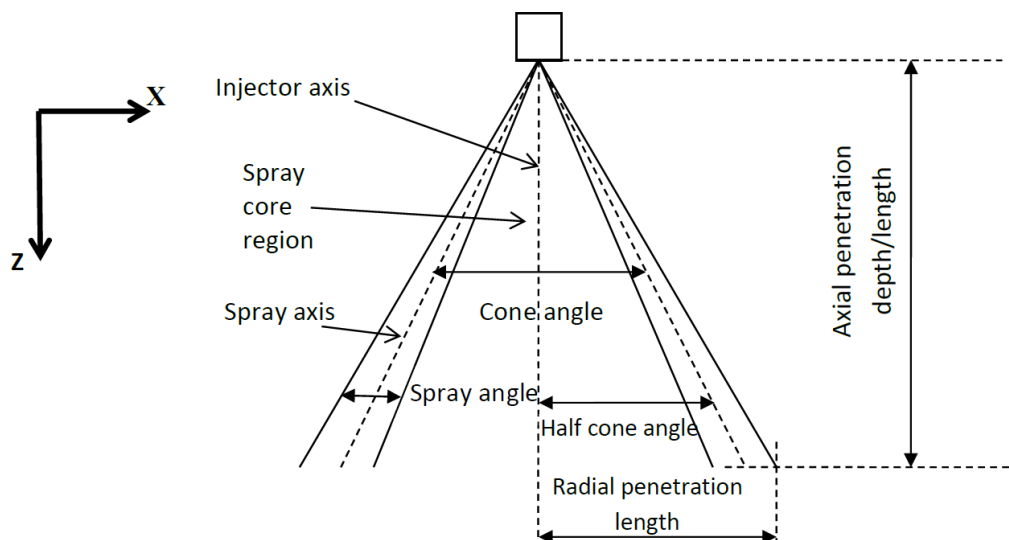
- Swirl: el movimiento es de rotación y se genera alrededor del eje del cilindro.
- Squish: el movimiento es radial y se confina en el interior de una precámara.
- Tumble: el movimiento es de rotación normal al del cilindro.

Estos movimientos se describirán más adelante.

### 3.1. Morfología general del spray

La posición global del inyector es de vital importancia para que la atomización sea eficiente, ya que se debe de dispersar toda la mezcla adecuadamente por todo el cilindro. Sin embargo, el impacto en las paredes del cilindro y la corona del pistón debe mantenerse al mínimo, ya que esto conduce a la formación de piscinas de combustible que no se queman por completo y forman emisiones de hidrocarburos no quemados [16].

A continuación, se indican los parámetros fundamentales del chorro de spray,



29. Morfología y parámetros fundamentales del spray. Fuente: [16].

**Longitud de penetración:** la longitud de penetración describe la distancia desde la salida de la boquilla hasta la punta instantánea de la atomización. A su vez hay dos subtipos en función de la dirección axial o radial. Por tanto, la penetración axial continúa el eje del inyector mientras que la penetración radial continúa transversalmente.

**Velocidad de penetración:** Velocidad de la punta de atomización.

**Ángulo de atomización:** según [16] es ángulo entre las extremidades opuestas de una columna de atomización desde la salida de la boquilla. Para un inyector de múltiples

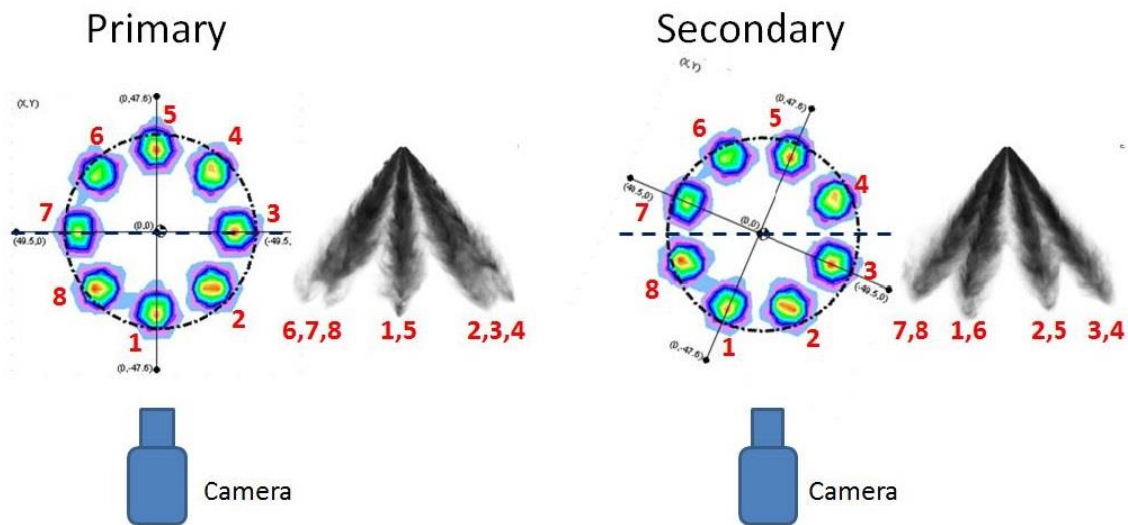
orificios, cada columna de rociado individual tendría un ángulo de rociado individual asociado. El ángulo de atomización es sensible a la ubicación de medición, ya que no es constante en la dirección del penacho debido al arrastre.

**Eje de atomización:** si el inyector es monoorificio se definen como el centro del único chorro principal de atomización. Sin embargo, si el inyector es multiorificio se define como el centro de cada chorro de atomización particular [16].

**Ángulo del cono:** lo mismo que con el eje de atomización, hay que diferenciar entre monoorificio y multiorificio. Si es monoorificio se describe como el ángulo del chorro, en este coincide con el ángulo de atomización. En cambio, si es multiorificio es el ángulo entre el eje de atomización para dos plumas de atomización opuestas.

**Numero de toberas de chorros:** Muchos inyectores tienen un número impar de toberas de inyección (por ejemplo, 3 toberas), de modo que el ángulo entre el eje del inyector y cada eje de atomización sería de  $45^\circ$ , y esto se clasificaría como un inyector de ángulo de medio cono de  $45^\circ$ , o incluso a veces como ángulo total del cono de  $90^\circ$  a pesar de que no hay dos columnas separadas por dicho ángulo [16].

En la imagen 30 se ve las características del inyector con el que se va a ensayar:



30. geometría del inyector de investigación TME. Fuente: [54].

### 3.2. Secuencia de procesos durante la inyección del chorro líquido

En un chorro líquido se ha de atomizar el combustible con el fin de crear gotas y favorecer la evaporación. Se puede diferenciar el procedimiento de dos formas, microscópico o macroscópico. Los dos tienen en común el mismo campo de

velocidades, campo de concentraciones y englobamiento del aire. Lo que les distinguen entre si son

- Macroscópica: se observa el campo de tamaños de gota.
- Microscópica: se observa la atomización y la interacción gota – aire.
- Desde el punto de vista microscópico referido a nuestro estudio, se puede diferenciar 2 fases de atomización, primaria y secundaria:

### 3.2.1. Atomización Primaria

Es la primera fase y aparecen perturbaciones en la superficie del líquido que se amplifican llevando a la rotura de la vena líquida inicial. En esta fase aparece una fuerte interacción con el movimiento del aire y conjuntamente turbulencia con el estado líquido. Como explica [16] es esencial atomizar la mezcla para crear una región dispersa con una gran cantidad de gotas, ya que esto aumenta el área de superficie total de la atomización y, por lo tanto, la velocidad de evaporación y la combustibilidad del mismo. A continuación, se indican las ecuaciones (2) (3) (4) que se utilizan para describir la atomización primaria.

Parámetros fundamentales:

$\rho_a$ : densidad del aire [kg/m<sup>3</sup>]

$U_0$ : velocidad de salida (relativa líquido /aire) [m/s]

$D_0$ : tamaño característico [m]

$\rho_f$ : Densidad del combustible [kg/m<sup>3</sup>]

$\mu$ : viscosidad del combustible [kg/ms]

$\sigma$ : tensión superficial del combustible [kg/s<sup>2</sup>]

Parámetros adimensionales:

Ecuación de Reynolds [55]

$$Re = \frac{\rho_f * u_0 * d_0}{\mu_f}$$

(2)

Ecuación Weber [55]



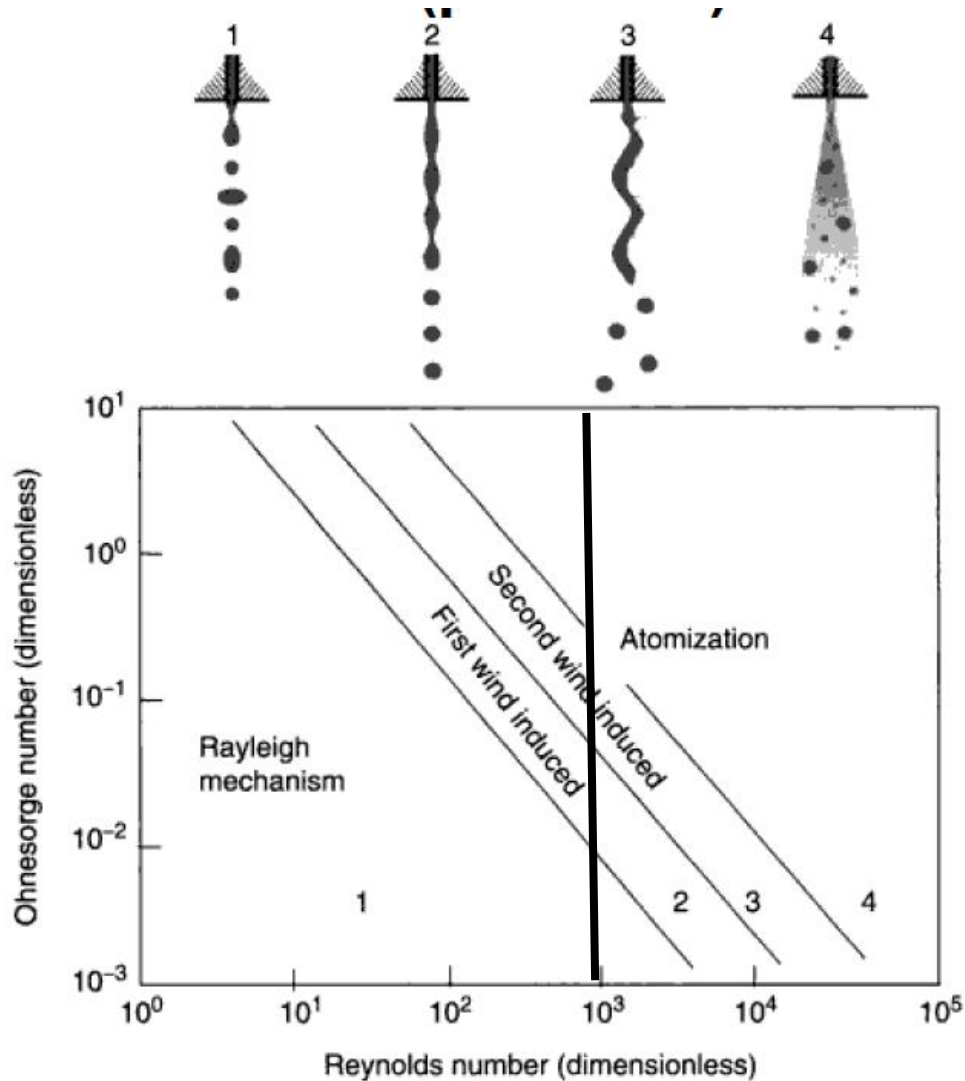
$$We = \frac{\rho_f * u^2_0 * d_0}{\sigma} \quad (3)$$

Ecuación de Ohnesorge [55]

$$Oh = \frac{\sqrt{We}}{Re} = \frac{\mu}{\sqrt{\rho_f * d_0 * \sigma}} \quad (4)$$

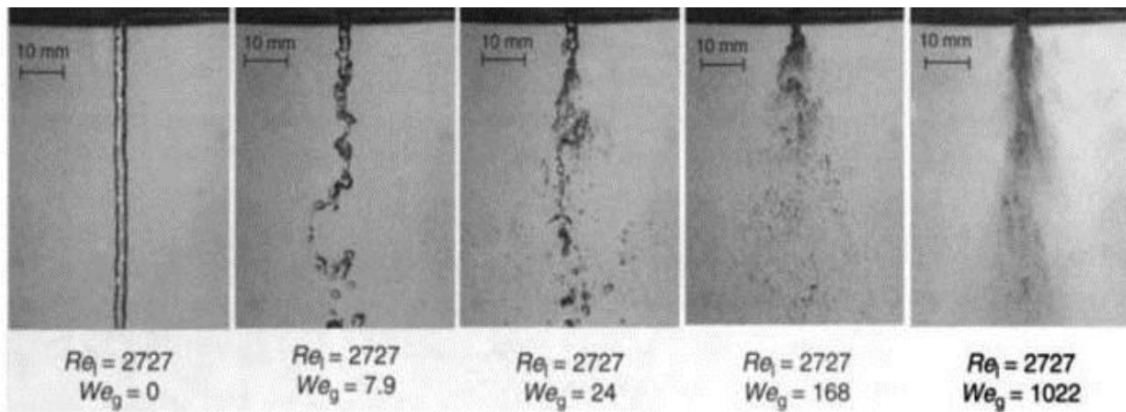
Para llegar a generar la región final ocurren otras regiones intermedias estudiadas ya y que se describen a continuación:

- **Región Rayleigh:** Rotura por fuerzas interiores del líquido, en concreto por oscilaciones axisimétricas de la superficie debidas a la tensión superficial. El tamaño de gota mayores que el diámetro del orificio de la tobera
- **1º interacción:** La interacción chorro-ambiente intensifica las oscilaciones. El tamaño de gota del orden del diámetro del orificio de la tobera
- **2º interacción:** Las gotas producidas por el crecimiento inestable de ondas superficiales de corta longitud de onda debidas a la interacción chorro-ambiente. El tamaño de gota es mucho más pequeño que el diámetro del orificio de la tobera.
- **Atomización completa:** la rotura ocurre prácticamente a la salida del chorro (puede existir un núcleo intacto muy corto). El tamaño de gota es mucho más pequeño que el diámetro de orificio de la tobera. la tangente del ángulo de apertura depende solo de las características de la tobera [55].



31. Regímenes de atomización primaria. Se puede observar a medida que aumenta el número de Reynolds y el número de Ohnesorge: el régimen de Rayleigh, régimen primario, régimen secundario, atomización. Fuente: [55][56]. Adaptado: [57].

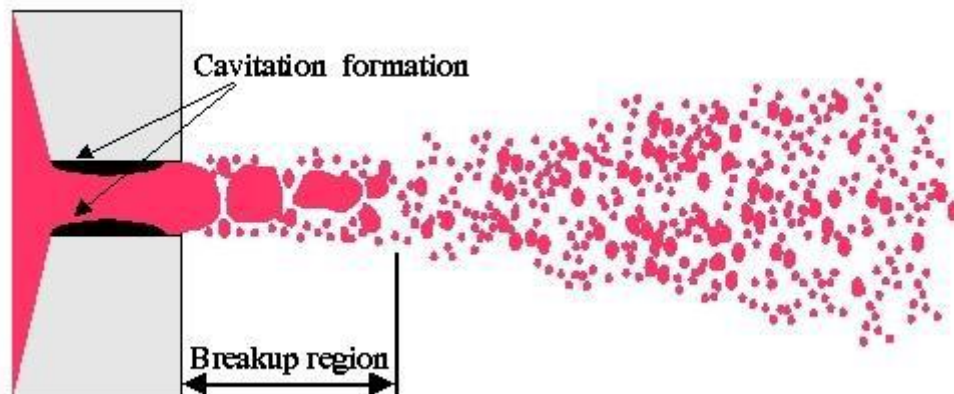
Como se ve en la ilustración 31 la atomización del fluido viene condicionada por dos parámetros adimensionales número de Reynolds y número de Ohnesorge. Un número de Reynolds alto (del orden de  $10^3$ ) es sinónimo de régimen turbulento, la turbulencia garantiza que el chorro de fluido se desarrolle al encontrarse con el aire. Este fenómeno se añade además la fuerza de resistencia o Drag, que garantizan la atomización. El régimen turbulento es un tema largo, complejo y que no entra dentro de este trabajo, por eso solo se va a dar cuatro pinceladas en un apartado más adelante.



32. Visualización directa de los regímenes del fluido para  $Re_1 = 2727$ . De izquierda a derecha: Régimen Rayleigh, 1º interacción, 2º interacción, atomización. Fuente: [55][56]. Adaptado: [57].

El número de Ohnesorge aumenta a medida que aumenta la velocidad del fluido frente a la tensión que se opone el aire. También hay que comprender que para una atomización perfecta es necesario que el número de Reynolds y weber entre el chorro del spray o espiga y el ambiente de la cámara de combustión tenga que ser alto, siendo el Reynolds superior 1000 y para el numero de weber superior a 1000 (imagen 32).

Otro condicionante importante en la atomización primaria es la cavitación. Como se observa en la imagen 33 la cavitación es la formación de burbujas dentro del seno de un fluido como respuesta a la diferencia de presiones ejercidas. Sigue la ecuación de conservación de Bernoulli y es un fenómeno dañino [55]:



33. Formación de la cavitación en el seno de un fluido de un conducto. la formación de las burbujas sigue la ecuación de conservación de Bernoulli y es la diferencia de presiones la que lo forma. Fuente: [55].

### 3.2.2. Atomización secundaria

La atomización secundaria es consecuencia de la interacción gota/aire en el ambiente. Se explica [55] cuando se produce la rotura de la gota en otras más pequeñas. Son importantes las fuerzas aerodinámicas, las de tensión superficial y viscosas internas. Es decir,

Fuerzas aerodinámicas >>> Fuerzas tensión superficial

Por tanto,

$$\text{Re} \uparrow \uparrow \quad C_d = 0.4 \quad \text{--->} \quad We_{crit} > 20$$

La explicación de las expresiones de arriba es que para que se produzca la condición de rotura o fraccionamiento del chorro en gotas y teniendo en cuenta que una gota tiene un coeficiente de resistencia de 0.4, el Reynolds (mide las fuerzas viscosas) tiene que ser alto, esto condiciona a que el número de Weber (mide las fuerzas de tensión superficial) no puede ser menor de 20. Cuando el Reynolds es alto y las fuerzas de aerodinámicas que actúan (Resistencia) también, el chorro se rompe en gotas, siempre y cuando la tensión superficial ( $We$ ) no sea inferior a 20. Si es menor de 20 entonces la rotura de la gota no se produce.

### 3.3. Movimiento del aire e interacción con el combustible

La interacción del fuel con el aire circundante durante la inyección es un papel fundamental en el proceso de formación de la mezcla y en el rendimiento de la combustión. Aunque este estudio se centra en la inyección especialmente, es primordial explicar que factores positivos tiene el movimiento del aire y la evolución en el interior del cilindro.

El proceso de la mezcla tiene las siguientes características

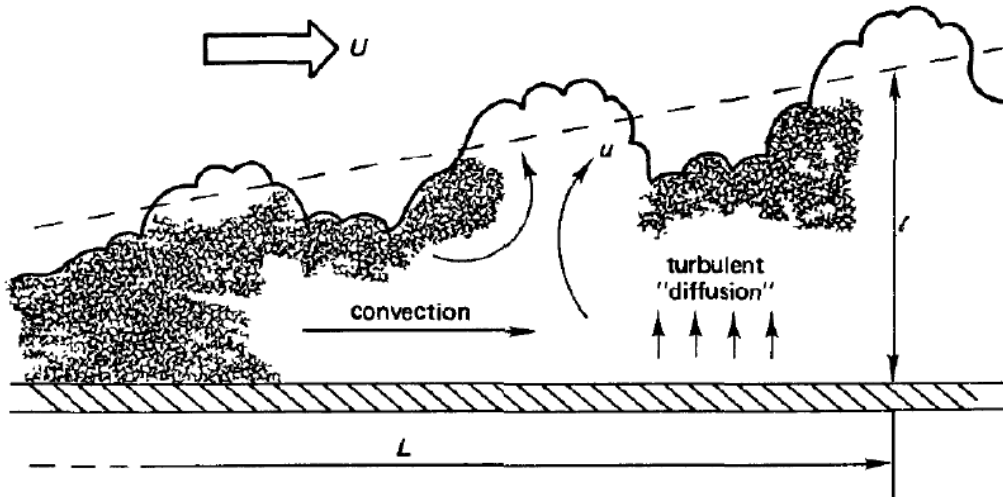
- Espacio de confinamiento
- Velocidad de interacción
- Tiempo de mezcla
- Fuerzas aerodinámicas de resistencia
- Efectos globales y locales
- Turbulencia del flujo en todas sus escalas

Adicionalmente, el movimiento del flujo en el interior del cilindro viene también determinada por la geometría de los conductos de admisión, por el movimiento del pistón y la variación entre los ciclos. Así pues, todas estas características tienen la influencia sobre la minimización de contaminantes y consumo de fuel el cual es el objetivo a perseguir.

### **3.3.1. Caracterización del flujo**

Antes de esquematizar las formas que existen para generar movimientos de aire es necesario parametrizar el flujo. En los flujos turbulentos los fenómenos de transporte de masa, cantidad de movimiento y energía y, consecuentemente, las tasas de mezcla, son varios ordenes de magnitud superiores a los asociados a difusión molecular. Esta difusión turbulenta es una consecuencia de las fluctuaciones locales del campo fluido y juega un papel dominante en el desarrollo de la combustión. Sin embargo, hay dos aspectos fundamentales de la turbulencia a tener en cuenta.

- Por un lado, la turbulencia es rotacional y por tanto viene determinado por una elevada vorticidad, de modo que las fluctuaciones de velocidad en un flujo turbulento pueden entenderse como asociadas a la existencia de vértices en el flujo de diferentes tamaños y velocidades de rotación.
- Y también los flujos de turbulencia son siempre disipativos, es decir, la energía cinética asociada a la turbulencia se disipa por fricción viscosa, produciendo un incremento en la energía interna del flujo. Por lo tanto, mantener las elevadas tasas de mezcla del flujo turbulento requiere el aporte de energía para generar y/o mantener esa turbulencia y evitar que decaiga [26].



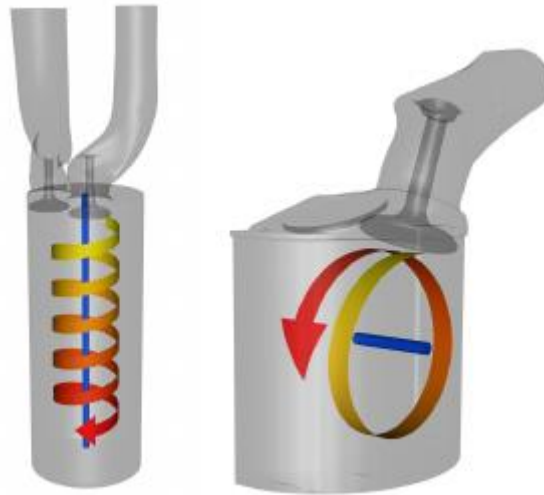
34. visualización de los movimientos de la turbulencia: convección y difusión o disipación. esto genera turbulencia rotacional o vórtice. [58].

### 3.3.2. movimiento del aire en el cilindro

Como se ha explicado ya, la estructura del flujo turbulento juega un papel importante en la preparación de la mezcla. A través de la cascada de energía turbulenta, donde se disipa la energía, se forman las escalas más pequeñas vitales para la ruptura del chorro del líquido. Para la generación de estos movimientos se han desarrollado tres fenómenos de generación que a continuación se describen.

#### 3.3.2.1. Swirl

Es el primero en formarse debido a la geometría de la admisión y al interior del cilindro. Se denomina remolino y es el movimiento del aire en rotación alrededor del eje del cilindro con un cierto momento angular que da lugar a la formación de una estructura que evoluciona hacia un vórtice forzado concéntrico al cilindro en figura 35. Este contribuye a distribuir el combustible en la cámara, mejorar la mezcla aire/combustible y el aprovechamiento del oxígeno disponible, así como reducir el efecto pared. Sin embargo, también es demasiado intenso y puede dificultar el desarrollo de la combustión como se verá más adelante [26].

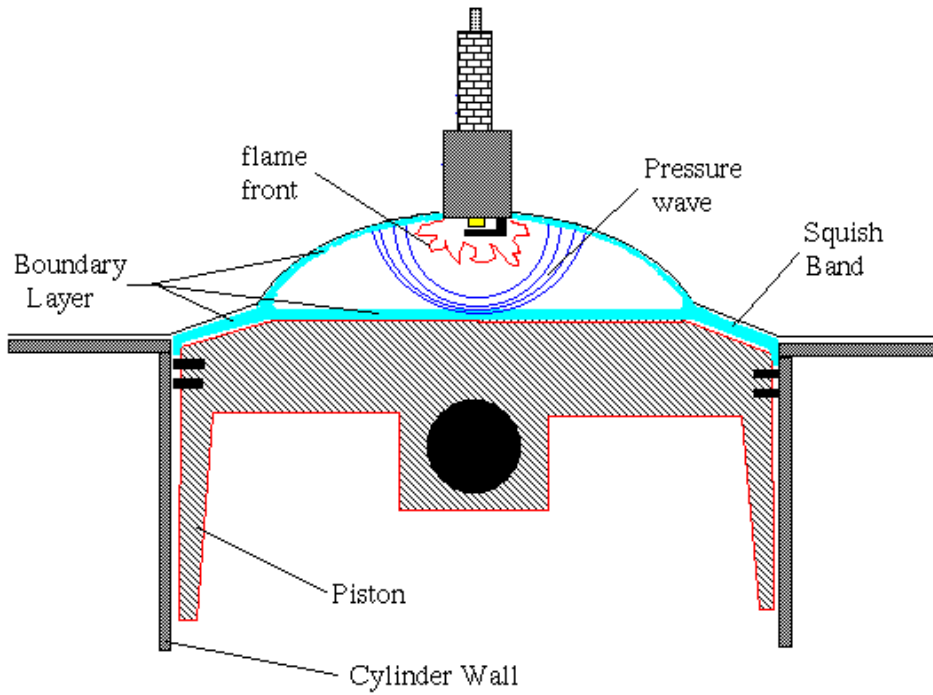


35. Fenómenos de movimiento rotacional del aire. A la izquierda (swirl) circula alrededor del eje alineado con el cilindro y a la derecha (tumble) circula perpendicular respecto del eje del cilindro. Fuente: [59].

Por tanto, la influencia para la generación de torbellinos puede ser el diseño de la válvula de admisión, excentricidad de la válvula respecto al eje del cilindro, inclinación de los conductos de entrada o la vectorización de las componentes de la velocidad del aire a la salida de la válvula.

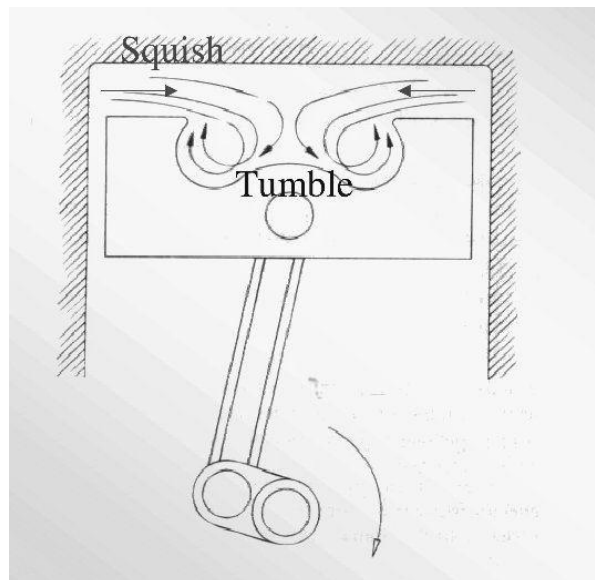
### 3.3.2.2. Squish

Se genera cuando se cierra la válvula de admisión a la vez que el pistón trabaja desde el PMI al PMS, comentado en 2.3.1, en la carrera de compresión. En el momento de confinamiento total, es decir, cuando el pistón alcanza el punto máximo, se distorsiona el flujo turbulento y se incrementa la intensidad en figura 36, en las paredes se concentrará la presión y rebota hacia el centro, generando una mezcla perfecta [26] [60].



36. Fenómeno squish en una cámara de combustión. Fuente: [60].

En el caso de que en la cabeza del pistón se haya mecanizado unas oquedades o en el término anglosajón bowl<sup>iv</sup>, este favorece la intensidad.



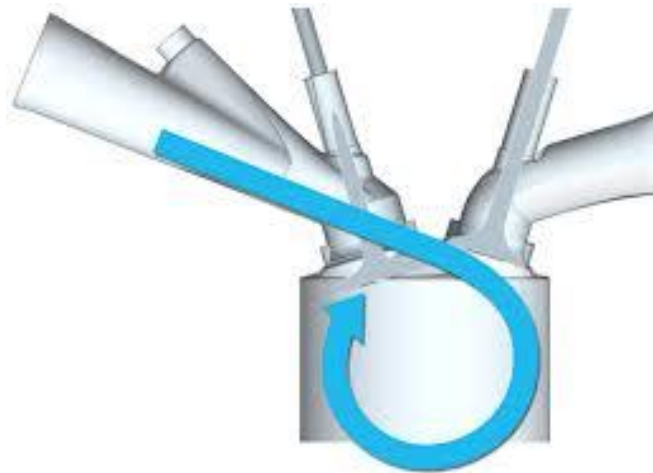
37. fenómenos de squish y tumble: Fuente: [61].

<sup>iv</sup> **Bowl**: termino anglosajón que indica a un recipiente redondo que está abierto en la parte superior y es lo suficientemente profundo como para contener materia.



### 3.3.2.3. Tumble

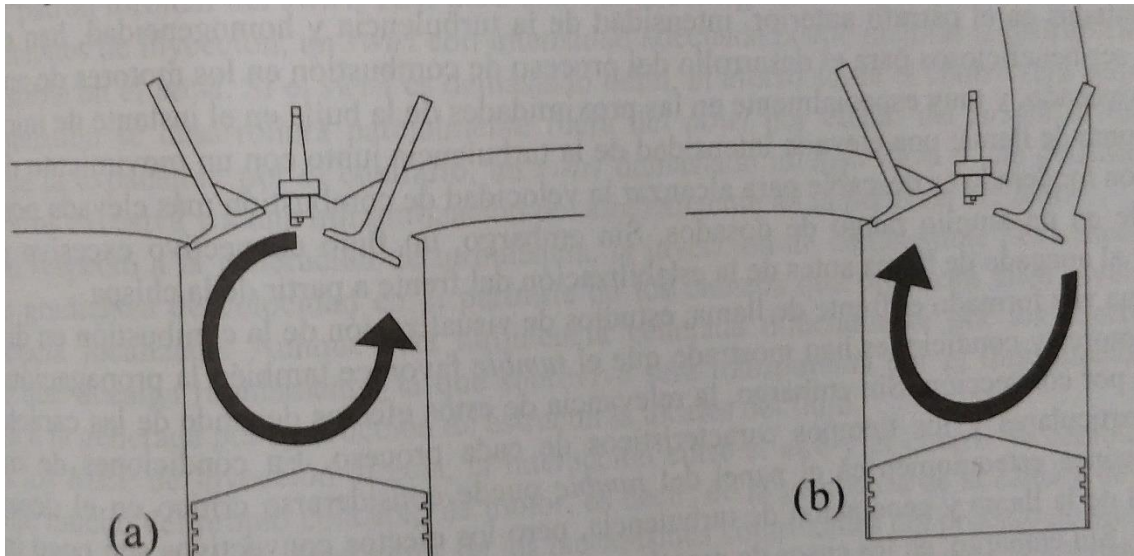
Se denomina caída o movimiento rotacional de la carga y es parecido al swirl (figura 37), sin embargo, el eje de rotación es normal o perpendicular al eje del cilindro, es decir, es el flujo de aire en el plano vertical dentro del cilindro. Este movimiento de fluido se produce cuando el flujo de aire de entrada sigue los contornos de la pared del cilindro. El flujo rotativo puede reducir considerablemente el período de combustión y, por lo tanto, aumenta la eficiencia térmica del motor y también aumentar sustancialmente la propagación de la llama como se ve en la figura 38, reducir las vibraciones cíclicas inesperadas y expandir el límite de inclinación.



38. Fenómeno de tumble o movimiento rotacional normal al eje del cilindro. Fuente: Internet.

Dependiendo de la geometría de la admisión se puede generar de dos maneras como se ve en la imagen 39: en el caso a) la deflexión en la cabeza del pistón origina un vórtice con su eje próximo al centro del cilindro pero que no suele subsistir hasta el final de la compresión y que desaparece al terminar la admisión, y a partir de ese momento el efecto dominante son las pérdidas por fricción del fluido con las paredes.

En el caso b) incrementar la inclinación de las pipas, de modo que la componente dominante del flujo que atraviesa la válvula, en lugar de barrer la culata, formando un vórtice con sentido de giro contrario al del caso anterior.



39. Formación del fenómeno tumble en función de la inclinación del colector de la admisión. Fuente: [26].

### 3.4. Flash boiling and spray collapse

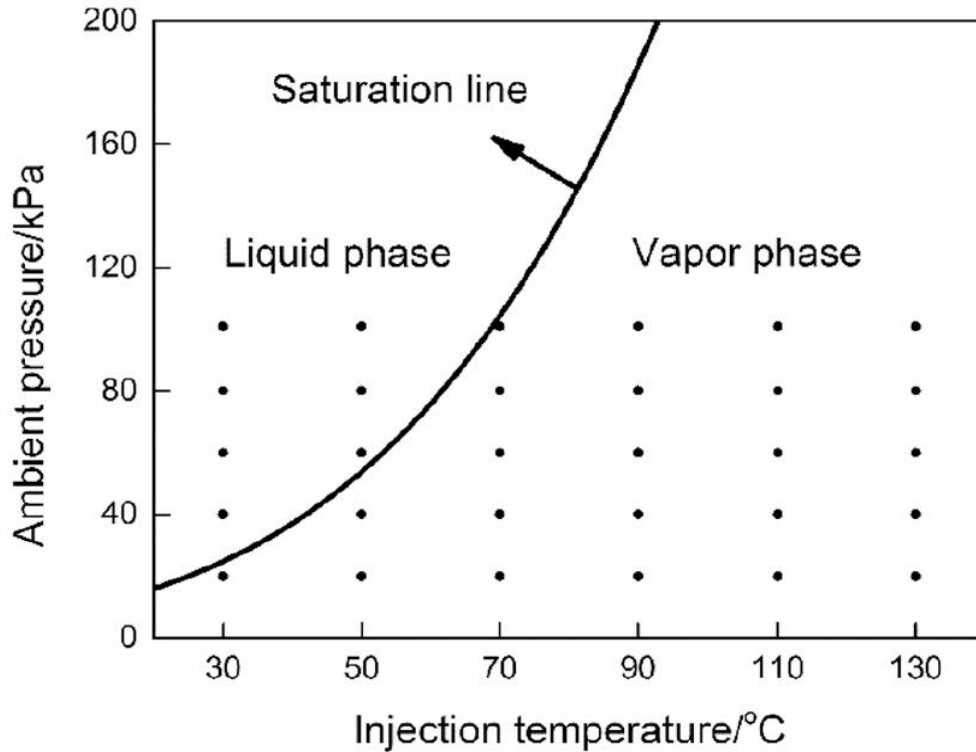
En esta sección se han a hablar de los fenómenos ocurrentes durante la atomización y atomización del líquido. Estos fenómenos son anómalos al principio de estudio, esto es, el comportamiento es difícil de cuantificar y por tanto son fenómenos difíciles de localizar y estudiar. En este estudio experimental se trata de descubrir estos fenómenos de forma empírica, ver cuando suceden y por qué suceden.

Antes de mostrar los resultados de este estudio experimental, se han realizado diversos estudios específicamente sobre los fenómenos de Flash boiling y Spray collapse sin una conclusión concreta. A continuación, se explica teóricamente las definiciones de los fenómenos

#### 3.4.1. Flash boiling

Un fuel puede estar en estado líquido o gaseoso si le incrementamos o decrecemos la temperatura y la presión tal y como se ve en la figura 40, esto es, el fuel se mueve de forma equilibrada, efectiva e ideal a través de la curva de vaporización. Además de esto, como ya se ha comentado el proceso en la sección 2.6.3, las Inter enlaces entre los átomos son bastante débiles y la capa superficial en contacto con el aire tiende a evaporarse en condiciones ambiente (a temperatura 25°, presión 1atm).

Ahora bien, si al fluido, como en este estudio, se le somete a una variación de temperatura o de presión fuera de curva de condición ocurren ciertos fenómenos como es el caso del *flash boiling* <sup>v</sup>o evaporación instantánea.



40. Ejemplo de vaporización del fuel n-hexano. Se muestra el diagrama temperatura inyección-presión ambiente. También se observa la curva de vaporización del propio combustible, es lógico que se encuentre entre los dos estados líquido-vapor. Si nos desplazamos a la zona izquierda de la curva nos encontramos con flash boiling. Los puntos representan los casos de estudio. Fuente: [62].

El flash boiling es un fenómeno anómalo y que surge o aparece cuando cambian las condiciones ambientales del fluido, es decir, ocurre cuando se inyecta un líquido en un entorno donde la temperatura es mayor que la de saturación del líquido o la presión ambiente es menor que la presión de vapor de saturación del líquido ecuaciones (5) (6). Esta inestabilidad termodinámica hace romper el chorro líquido. Esta inestabilidad térmica se denomina “Sobrecalentamiento”.

$$\Delta P = \frac{P_{sat} - P_{amb}}{P_{amb}} \tag{5}$$

<sup>v</sup> **Flash boiling**: término anglosajón que hace referencia al fenómeno que ocurre cuando se inyecta un líquido en un entorno donde la temperatura es mayor que la de saturación del líquido o la presión ambiente es menor que la presión de vapor de saturación del líquido. Esta inestabilidad termodinámica hace romper el chorro líquido.

$$\Delta T = T_{fuel} - T_{sat} \quad (6)$$

Siendo  $P_{sat}$  y  $T_{sat}$  la presión y temperatura de saturación del fuel, y  $T_{fuel}$  y  $P_{fuel}$  como la presión y temperatura del fuel. Las ecuaciones anteriores determinan la diferencia de temperatura y presión con respecto a la curva de vaporización. La curva marca la frontera de dos regiones, vapor y ebullición, con las fórmulas se averigua en que región se encuentra el punto de estudio.

Desde el punto de vista geométrico también aparece por la geometría de la tobera de salida del inyector y por el número de agujeros

#### 3.4.1.1. Mecanismos microscópicos de formación de Flash- boiling

La formación del flash boiling en sprays de gasolina involucra varias fases complejas como:

- nucleación,
- crecimiento de burbujas,
- estallido de burbujas,
- atomización,
- flujo de dos regímenes.



41. Procedimiento del flash boiling. Fuente: extraído de [16] [62].

La nucleación es la primera fase del flash boiling y es el origen de las burbujas dentro del fluido. Se pueden identificar dos mecanismos de nucleación, la nucleación homogénea y la nucleación heterogénea.

- En la nucleación homogénea, se forman sitios de nucleación dentro del propio líquido, en ausencia de cualquier núcleo de burbuja, con una distribución homogénea. Este proceso se vuelve predominante cuando la presión del líquido se reduce considerablemente.

- En la nucleación heterogénea ocurre cuando las fases gaseosa y sólida aparecen en una interfaz o un límite en lugar de en el líquido. Suelen aparecer en superficies irregulares como en las paredes de las cabezas del pistón o en presencia de polvo u tras partículas sólidas dentro de la cámara de combustión [63][64].

A través de la teoría clásica de la nucleación (CNT) puede usarse bien para analizar el proceso de nucleación. Generalmente, la tasa de nucleación  $J$  ecuación (7) puede expresarse como [65],

$$J = \sqrt{\frac{2\sigma}{\pi m}} \exp\left(-\frac{\Delta G^*}{k_B T_{inj}}\right) \quad (7)$$

donde  $\sigma$  es la tensión superficial,  $m$  es la masa de una molécula líquida,  $k_B$  es la constante de Boltzmann,  $T_{inj}$  es la temperatura de inyección y  $\Delta G^*$  es la energía libre de Gibbs, que se describe como ecuación (8)

$$\Delta G^* = \frac{16\pi(\vartheta_l)^2\sigma^3}{3|\Delta\mu|^2} \quad (8)$$

donde  $\vartheta_l$  es el volumen específico del estado líquido, y  $\Delta\mu$  es la diferencia de potencial químico entre las fases líquida y de vapor. Para la nucleación heterogénea, la barrera de energía libre es menor que la nucleación homogénea [64].

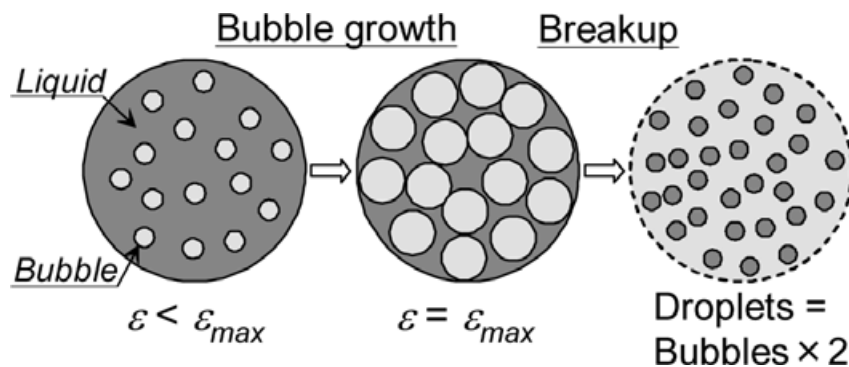
Después de la nucleación, se produce el crecimiento de las burbujas en imagen 42. El crecimiento de burbujas dentro de una gota es limitado. Este límite está determinado por el diámetro de la gota, la tensión superficial, la viscosidad del líquido, la densidad numérica de los núcleos de burbujas y la tasa de crecimiento. El límite de la tasa de crecimiento de burbujas dentro de una gota se describe mediante la fracción vacía,  $\varepsilon$ , definida como la relación de volumen entre las fases de vapor y líquido ecuación (9)

$$\varepsilon = \frac{V_{bubble}}{V_{bubble} + V_{liquid}} \quad (9)$$

donde  $V_{\text{bubble}}$  es el volumen de burbujas y  $V_{\text{liquid}}$  es el Volumen de líquido.

Para que se forme el crecimiento de las burbujas según [63] debe de haber los siguientes condicionantes:

- Si la burbuja todavía es pequeña, la tasa de crecimiento es baja y está restringida por la tensión superficial de la burbuja.
- Si el grado de sobrecalentamiento es lo suficientemente grande, la tasa de crecimiento alcanza un máximo a medida que aumenta el tamaño de la burbuja. El líquido que rodea la burbuja se enfría debido a la transferencia de energía térmica necesaria para la evaporación. La presión de vapor disminuye y la velocidad de crecimiento de la burbuja está controlada por la inercia y la difusión térmica.
- Si La tasa de crecimiento de la burbuja disminuye aún más y los efectos de inercia se vuelven menos importantes. La presión interior de la burbuja y la temperatura se aproximan a los valores ambientales y cuando esto sucede, el crecimiento se detiene.

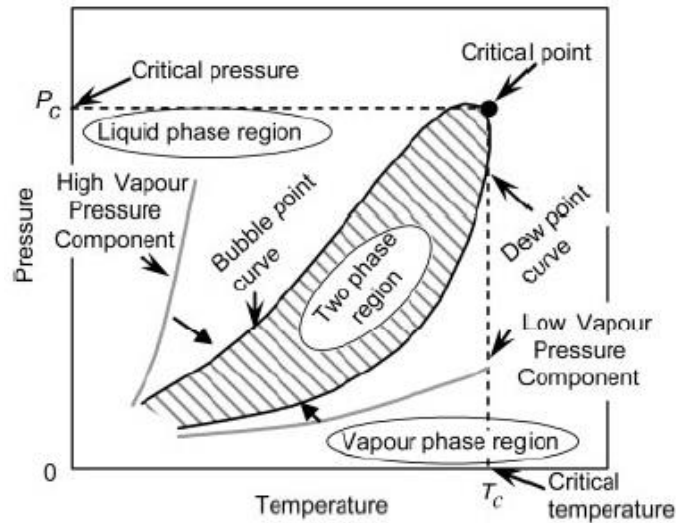


42. Proceso visual de la formación de las burbujas. de izquierda a derecha: nucleación, crecimiento y estallido [16][63].

Una vez que el crecimiento de la burbuja ha causado que la fracción vacía alcance un valor crítico, de modo que las burbujas interactúen entre sí, la gota se romperá y formará una nube de muchas gotas pequeñas. el valor de  $\epsilon$  que se correlaciona con este procedimiento de ruptura es de 0,51 a 0,53 para el combustible para aviones. El modelo de Kawano [63][66] especifica que el número de gotas después de la ruptura será el doble del número de burbujas anteriores. Una vez completado este proceso, se formará una mezcla de gotas de líquido rodeadas de vapor.

La atomización se produce cuando impulso de la caída original se distribuirá entre las gotas secundarias.

Una vez que se completa el proceso de flash boiling, se obtiene un flujo de dos fases que consiste en fluido y vapor en equilibrio imagen 43.



43. Representación de los dos regímenes de flash boiling originados sobre la curva de vaporización del fuel. Se observa en la región central los dos regímenes y a los lados las dos fases de líquido y vapor. Fuente: [63].

Según VanDerWege, del instituto de tecnología de Massachusetts [67] identificó dos regímenes de flash boiling, uno interno y otro externo.

- El régimen interno ocurre cuando se forman burbujas dentro del orificio del inyector que conduce a la expulsión de un flujo de dos fases que consiste tanto en líquido como en vapor. El aerosol se expande rápidamente al salir del inyector.
- El régimen externo ocurre cuando el chorro de líquido está intacto cuando sale del orificio del inyector, pero luego se rompe por el rápido crecimiento de la burbuja a medida que se mueve aguas abajo del orificio.

Se puede afirmar además que la fuerza impulsora del fenómeno de flash boiling es la diferencia de temperatura entre el combustible cuando sale de la boquilla del inyector y el punto de ebullición del combustible en la condición de presión en la que se expande el combustible. Esto puede cuantificarse como el "grado de sobrecalentamiento" y la investigación ha demostrado que la atomización de un chorro de líquido aumenta considerablemente cuando el grado de sobrecalentamiento es lo suficientemente grande como para causar el flash boiling. En el trabajo [68] comenta que el flash boiling afectará notablemente la estructura del rociado cuando el grado de recalentamiento sea de  $20^{\circ}\text{C}$  o más, sin embargo, el grado exacto de recalentamiento necesario para causar

la ebullición depende del acabado superficial del inyector, orificio y el número de Weber del chorro de líquido [63][67][68].

### **3.4.2. Spray collapse**

Este concepto es relativamente novedoso, la información que hay no es abundante y las conclusiones a las que se llegan normalmente no resultan concluyentes, aunque los estudios cada vez son mayoritarios como es este estudio experimental. En los siguientes apartados se ha recogido la información esencial de lo que se cree cuáles son los motivos por los que se general este colapso.

#### **3.4.2.1. Influencia de presión y temperatura**

El colapso de spray o en ingles spray collapse es básicamente una consecuencia del flash boiling. Debido a:

Por una parte, al sobrecalentamiento de la temperatura del fuel

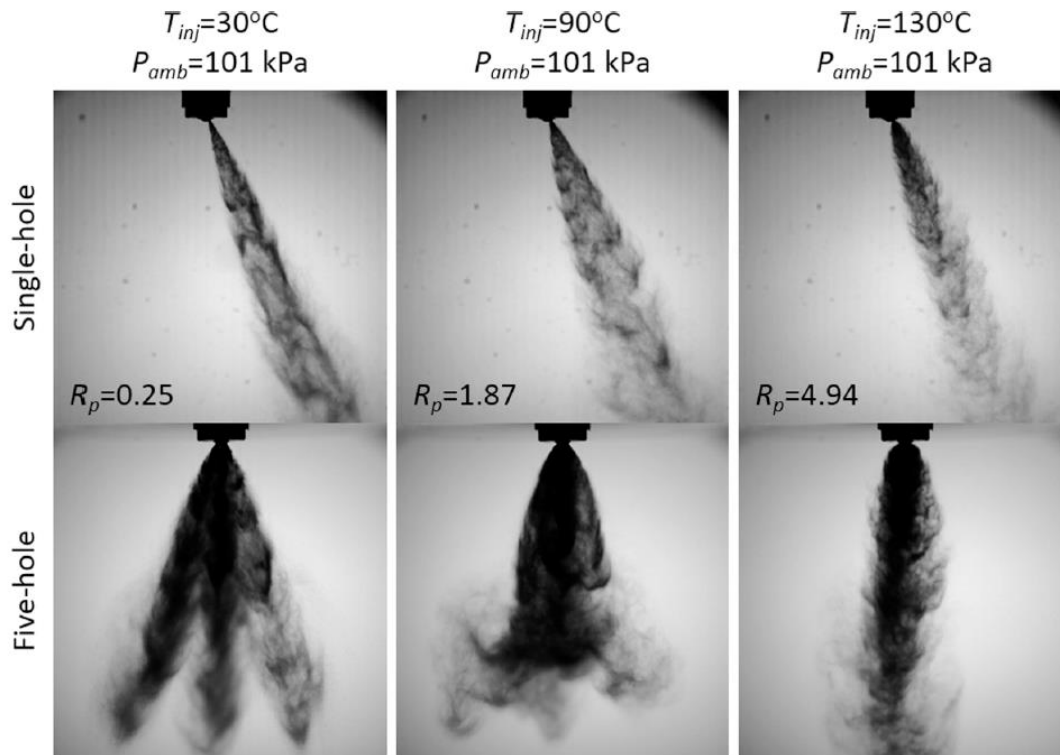
Por otra parte, a la diferencia de presión entre la presión ambiente con la presión de referencia

$$P_{sat} > P_{amb}$$

Básicamente, a altos grados de sobrecalentamiento hay una mejora esperada en la calidad de atomización, caracterizada por una reducción en la longitud de ruptura. Esto también se asocia con un aumento en el ángulo de atomización y, por lo tanto, un aumento en la dispersión de gotas. Para altas presiones de ambiente la dispersión es mayor ya que las gotas pierden mucha energía cinética al encontrarse con la presión y la forma de disipación para es a través de la fricción por el aumento del número de gotas. Pero para presiones cercanas a la presión de vapor de saturación, ocurre lo contrario, hay un aumento en la longitud de ruptura. Esta reducción en el nivel de atomización corresponde a una reducción en el ángulo de atomización y, por lo tanto, a la dispersión de gotas.

Si se está en la condición de presión justo debajo de la presión de vapor de saturación, la atomización singular forma densa y estrecha. Hay que saber diferenciar entre mono-orificio y multi-orificio, siendo este último la más perjudicial





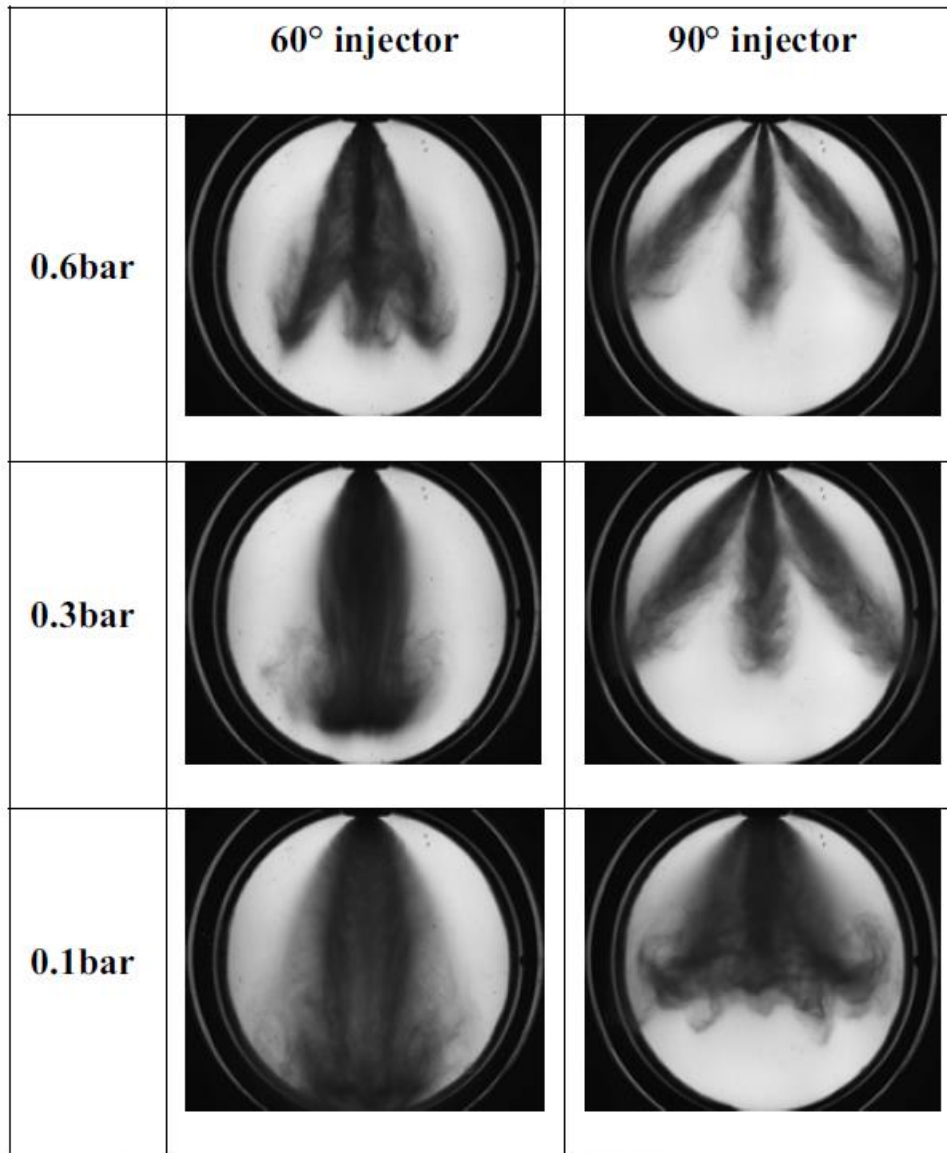
44. Comparación de la morfología de los sprays de salida entre monoorificio y multiorificio. Datos para  $P_{amb}=1\text{ atm}$ ;  $T_{fuel}= 30^{\circ}, 90^{\circ}, 130^{\circ}$ . Con el factor de sobrecalentamiento y a bajas presión igual a la de saturación pierde calidad la atomización, pero no se aprecia colapso. Como ya se verá, para multiorificio si aparece colapso. Fuente: [62].

#### 3.4.2.2. Geometría de la tobera

También es debido, aunque es menos evidente, a la geometría propia de la tobera. aunque se nos escapa de este estudio, porque ya tenemos el inyector diseñado y construido, pero una geometría sin un estudio de fluidodinámica concurrente estudia el influjo de cavitación que se podría formar en la zona de la garganta de la tobera.

#### 3.4.2.3. Interacción entre chorros

Por último, y no menos importante, para sprays multicolor como es en este estudio, aparece la interacción entre los sprays de chorro.



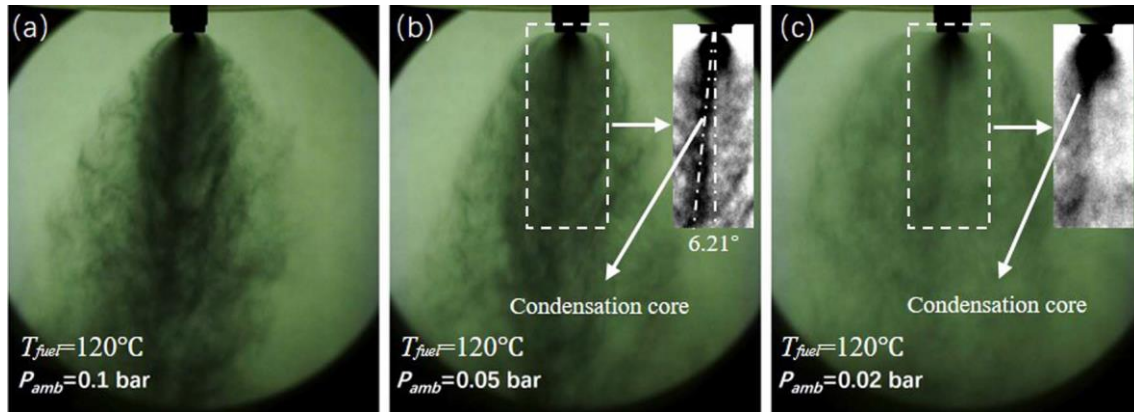
45. Imágenes de morfología de los sprays de salida de ejemplo de colapso de spray. estas medidas han sido tomadas a  $T_{fuel}=60^{\circ}C$ ,  $P_{iny}= 120 \text{ bar}$ .  $P_{amb}=0.1,0.3,0.6 \text{ bar}$ . Se puede observar como a medida que disminuye más la presión ambiente, los chorros se unen más y se acercan al eje axial del inyector.  
Fuente: [63].

El colapso del spray no se produce por cada una de las implicaciones antes mostradas, sino por todas juntas como se observa en la imagen 45 en la que se aprecia como a medida que disminuye más la presión ambiente, los chorros se unen más y se acercan al eje axial del inyector

#### 3.4.2.4. Condensación del spray multiorificio

Tras ver los motivos principales por los que se forma el colapso se comenta las consecuencias directas e importantes

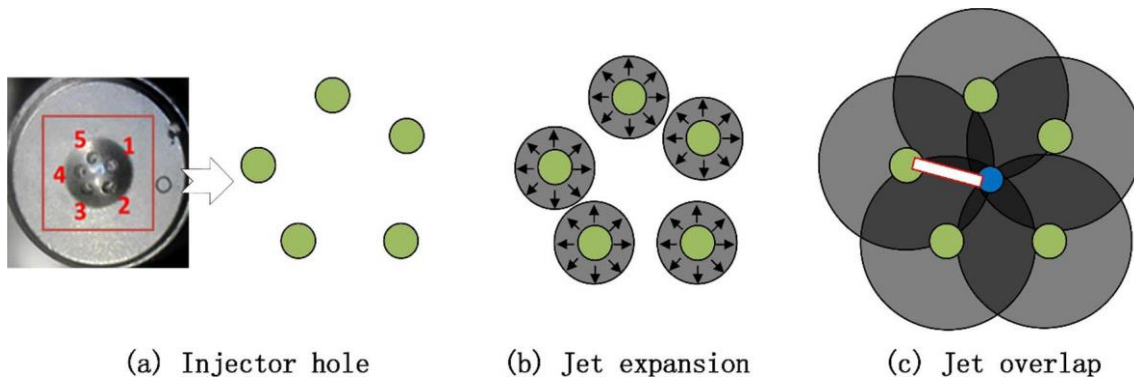
Cerca de la tobera se produce una zona de bajas presiones y condensación del fuel. Tal y como se cuenta en el artículo [69] se llevó a cabo un grupo adicional de pruebas con la temperatura del líquido fijada a 120 ° C, pero presiones ambientales muy reducidas. Las imágenes de atomización a 1,6 ms de ASOT se proporcionan en la figura 46 y las presiones ambientales son de 0,1, 0,05 y 0,02 bar.



46. Imágenes de la morfología de salida de los sprays con colapso. Se observa cerca de la salida condensación del flujo debido a la bajada de la presión ambiente. Fuente: [69].

Claramente, el ancho del chorro aumentó significativamente con la disminución de la presión ambiente. El ancho de atomización enormemente aumentado puede atribuirse a los siguientes dos factores: (1) la disminución de la presión ambiente reduce la resistencia de la expansión radial de la atomización; (2) la disminución de la presión ambiente también aumenta el grado de sobrecalentamiento, y esto podría mejorar la generación de burbujas y la intensidad del estallido de la burbuja. La expansión significativa con la presión ambiente reducida hace que el campo de atomización sea más diluido, lo que permite identificar la estructura interna de la atomización de ebullición instantánea. Las imágenes bajo las presiones ambientales de 0.05 y 0.02 bar se mejoran parcialmente para presentar la estructura interna.

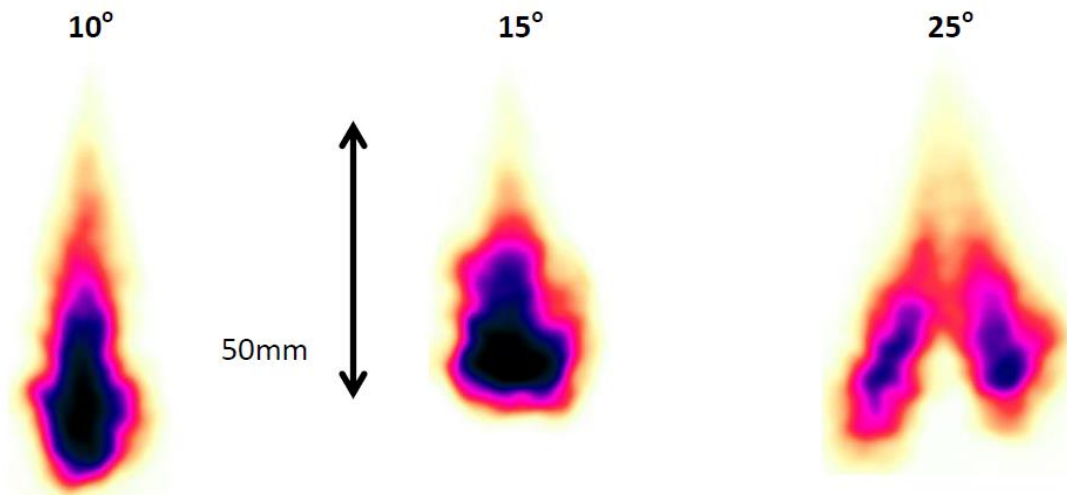
En la siguiente imagen 47 se realiza una descripción visual cuando se produce colapso cerca de la tobera.



47. descripción visual de la interacción de los chorros y zona que queda en el eje axial del inyector a bajas presiones. Fuente: [69].

En cuanto a la morfología de la salida del spray lejos de la tobera se analizó de la siguiente manera [16].

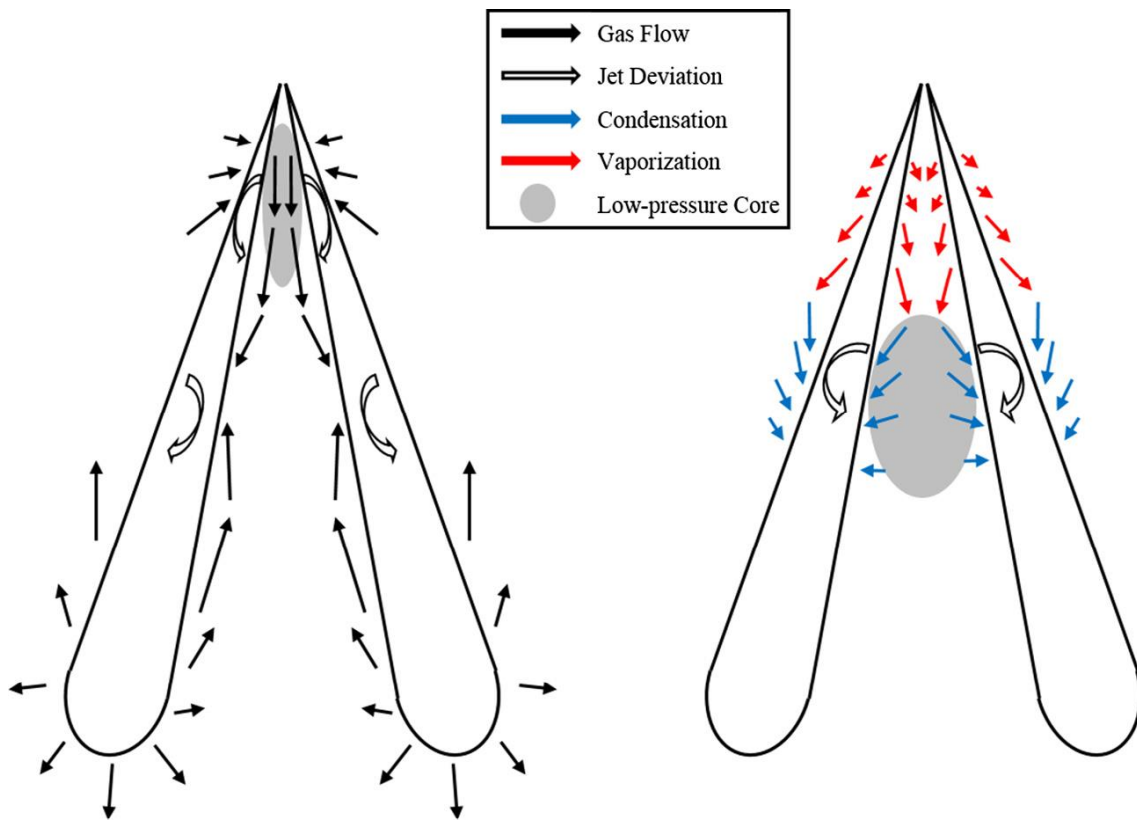
Una investigación adicional usó una serie de boquillas de dos orificios con diferentes ángulos divergentes entre las orientaciones de los orificios para examinar el efecto de esta característica de diseño en la formación de atomización utilizando la técnica de dispersión por absorción láser (LAS). Los resultados se obtuvieron en condiciones de temperatura y presión de 500K y 10bar. Los resultados mostrados en la figura 48 para las tres configuraciones de ángulos divergentes diferentes muestran un claro colapso de la atomización inducido por las interacciones de corriente a corriente.



48. Morfología de la salida de spray en campo lejano y con colapso. se observa que el chorro llega más lejos. El colapso incrementa la penetración. Fuente: [16].

Por tanto, El colapso de los sprays conduce a un aumento en la penetración del chorro, y a la reducción del cono del mismo. El colapso afecta al rendimiento de la combustión.

En la siguiente imagen 49 se realiza una descripción visual de la morfología del chorro cuando se produce colapso.



49. Morfología de salida de los sprays en campo lejano. se visualiza la morfología con colapso inducido (izquierda) y con colapso de condensación (derecha). Fuente: [70].

Esto es, para el supuesto de un colapso total de la atomización, la penetración axial aumenta a medida que todas las gotas y el vapor viajan a lo largo del eje del inyector



## Capítulo 4

---

# 4. Metodología experimental de trabajo

---

Este capítulo presenta el equipo experimental utilizado y la metodología seguida para realizar las mediciones y el análisis de datos presentados en los capítulos siguientes. En la primera sección se describirán los diferentes sistemas, se plasmará el montaje e instalación de los equipos de cada sistema. Luego se describe la obtención de datos y a su posterior procesamiento por ordenador.

Para la ejecución de estas labores y mediciones se empleará material propio del CMT como maquetas, mesas de trabajo, herramientas y aparatos, así como ordenadores para el procesamiento. En cuanto a esto, se utiliza el programa el software avanzado en matemática Matlab. Las mediciones se realizan también en los laboratorios de CMT-Centro de motores térmicos.

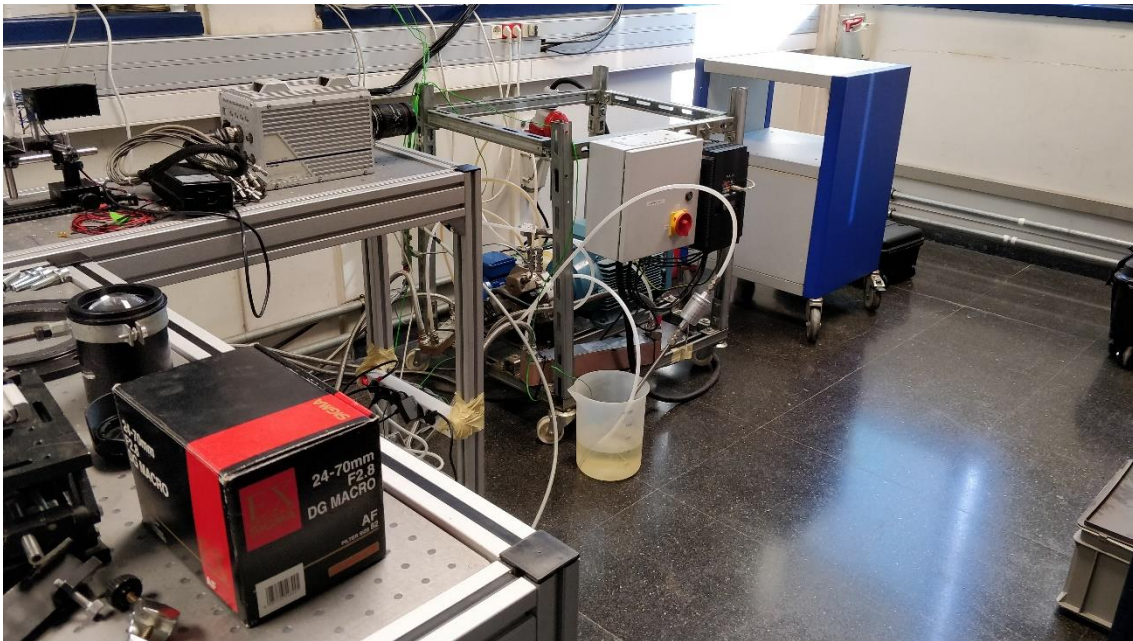
### 4.1. Sistema de alimentación

El sistema de alimentación se encarga de suministrar la cantidad de combustible necesario a la maqueta. La maqueta es el lugar donde se estudiará la inyección, es una

caja ahuecada en cuyo interior se experimentará los ambientes más parecidos al cilindro del motor y donde se inyecta el combustible. Las paredes de la maqueta están visibles y protegidas por cristales circulares y pernos de protección para poder ver la parte interna de la maqueta.

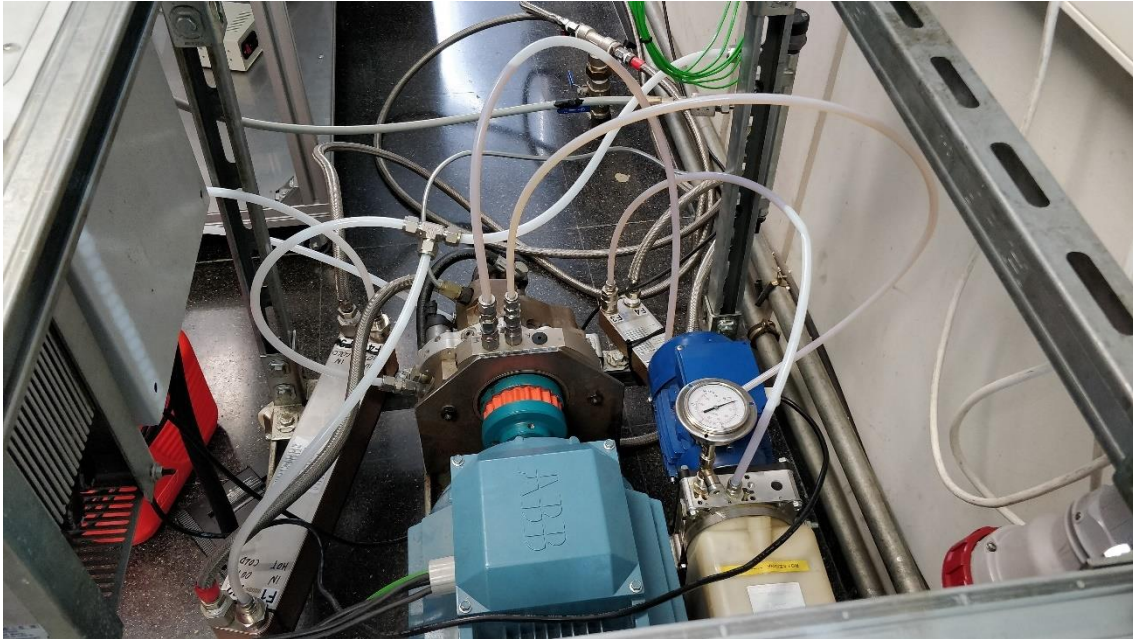
Volviendo al sistema que trata este apartado, el sistema de alimentación es el más complejo y largo debido a la serie de tuberías que se comunican a la maqueta en imagen 50 51. Además de suministrar el caudal también debe de hacerlo con la presión de inyección de estudio (100 – 200 bar).

Este sistema lleva los subsistemas de lubricación, refrigeración, eléctrico, mecánico. A continuación, se desglosa este sistema en las distintas partes y se describirá los componentes de cada parte.



50. Equipo de alimentación y bombeo de fuel para el sistema de inyección, vista posterior. Se observa en la parte central el cuadro eléctrico del motor eléctrico, el sistema de refrigeración lubricante combustible. Fuente: Centro de Motores Térmicos (24/02/2020).





51. Equipo de alimentación y bombeo de combustible para el sistema de inyección, vista anterior. Se observa en la parte central la bomba que mueve el circuito de combustible, tubos de suministro de transporte y de retorno; en la parte inferior el motor eléctrico, depósito de aceite para el sistema y su correspondiente bomba de impulso y barómetro de control; en el lado izquierdo de la imagen el depósito de combustible, cuadro eléctrico; y ambos lados y con forma de tetraedro están los sistemas de refrigeración agua – combustible (izquierda) lubricante – refrigerante (derecha). Fuente: Centro de Motores Térmicos (24/02/2020).

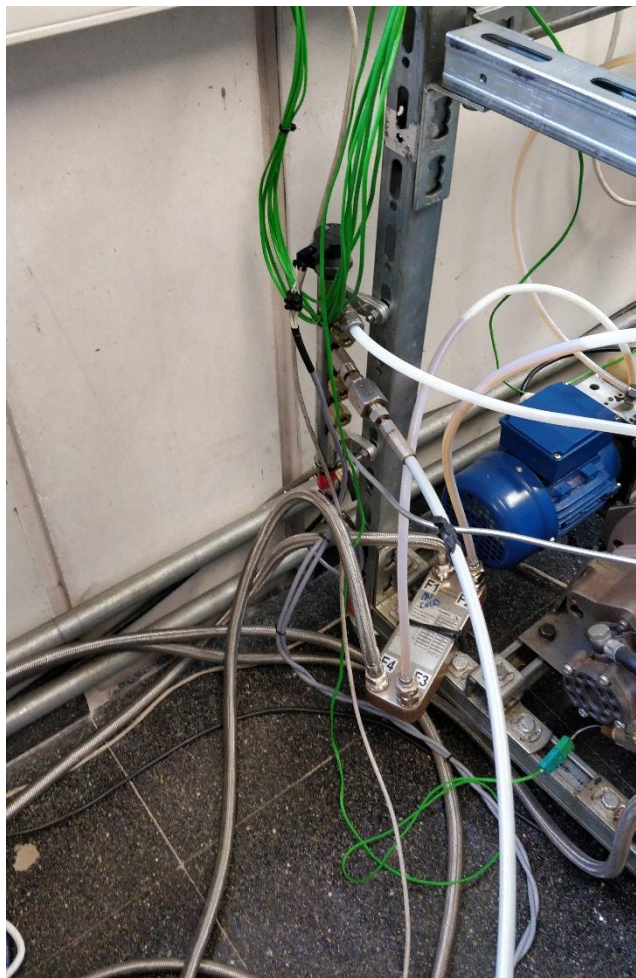
Principalmente está el grupo de motor eléctrico – bomba que impulsa el caudal de combustible y proporciona la presión de inyección. Este grupo está sujeto en una cuna o soporte con carrito imagen 51. Para un funcionamiento correcto lleva un sistema de lubricación y dos sistemas de refrigeración, uno (refrigerante – lubricación) y otro (refrigerante – combustible). El motor como ya se ha comentado es eléctrico y la bomba es mecánica de lóbulos. Acoplado a esto hay un sistema eléctrico que da energía y movimiento al motor eléctrico. Consta de un cuadro eléctrico trifásico que regula solamente la entrada de voltaje e intensidad. También hay un regulador de frecuencia del motor eléctrico con mando para ser regulado de forma manual.

## 4.2. Sistema común - rail

El combustible una vez sale del depósito y se le es impulsado con la bomba regulada pasa por el primer rail de dos que hay. Ya se ha comentado que el motivo de colocar dos railes es para mitigar las ondas de presión de la bomba.

El común rail es un conducto metálico rígido con 4 entradas y/o salidas comunicantes y un regulador de control electrónico o ecu (Unidad de control electrónico) que gobierna al común rail en imagen 52. Lleva las siguientes partes:

- **Entrada:** conducto de entrada donde entra el combustible.
- **Principal:** conducto principal donde están comunicados todos los conductos
- **Salida:** conducto de salida de combustible.
- **Regulador electrónico:** controla y regula el caudal y presiones que le llega al común rail. Esta gobernado con la ecu.
- **Válvula de presión antirretorno:** esta válvula esta comunicada con la ecu y ejecuta las ordenes de la ecu en función de si la presión es más alta de la norma, abriéndose, o cerrándose si es el caso contrario y además se puede controlar el caudal de forma manual. El combustible que sale vuelva al depósito.



52. Common rail. su objetivo es transmitir el combustible de manera uniforme. Tiene las siguiente tes partes de arriba abajo: cableado de unión del ecu con la válvula, conducto de retorno, conducto de salida y transmisión al otro rail, conducto de entrada de combustible. Fuente: Centro de Motores Térmicos (24/02/2020)

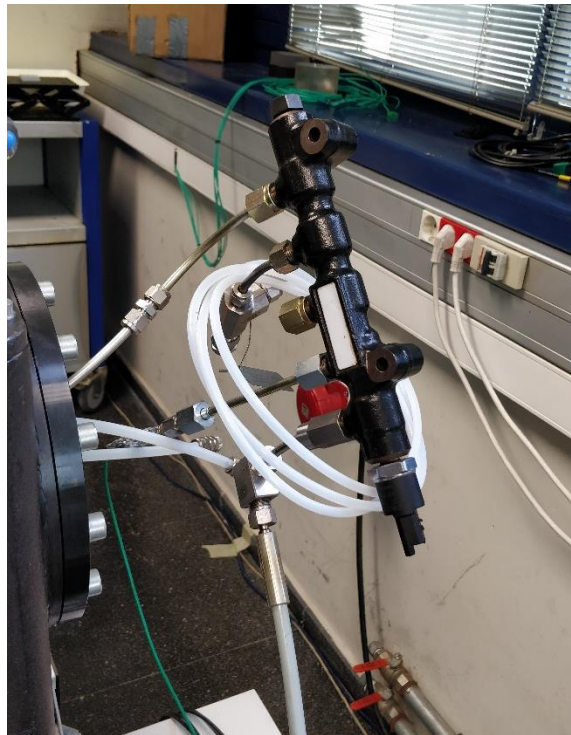
Sus dos objetivos principales son limitar tanto las fluctuaciones debidas a la bomba de alta presión recíproca como la caída de presión que ocurre durante el proceso de

inyección. Un dispositivo que libera combustible del riel al depósito ayuda a controlar la presión por las diferencias de los flujos de entrada y salida [71][72].

#### 4.2.1. Conducto de salida del combustible de alta presión y segundo común rail

Este conducto transmite el combustible del sistema de alimentación al sistema de inyección experimental. Es por tanto un conducto importante y por eso el material del que este hecho es de un plástico reforzado, además tiene que soportar elevadas presiones que le llega del conjunto motor-bomba.

Antes de pasar al sistema de inyección, el combustible pasa por el segundo rail.

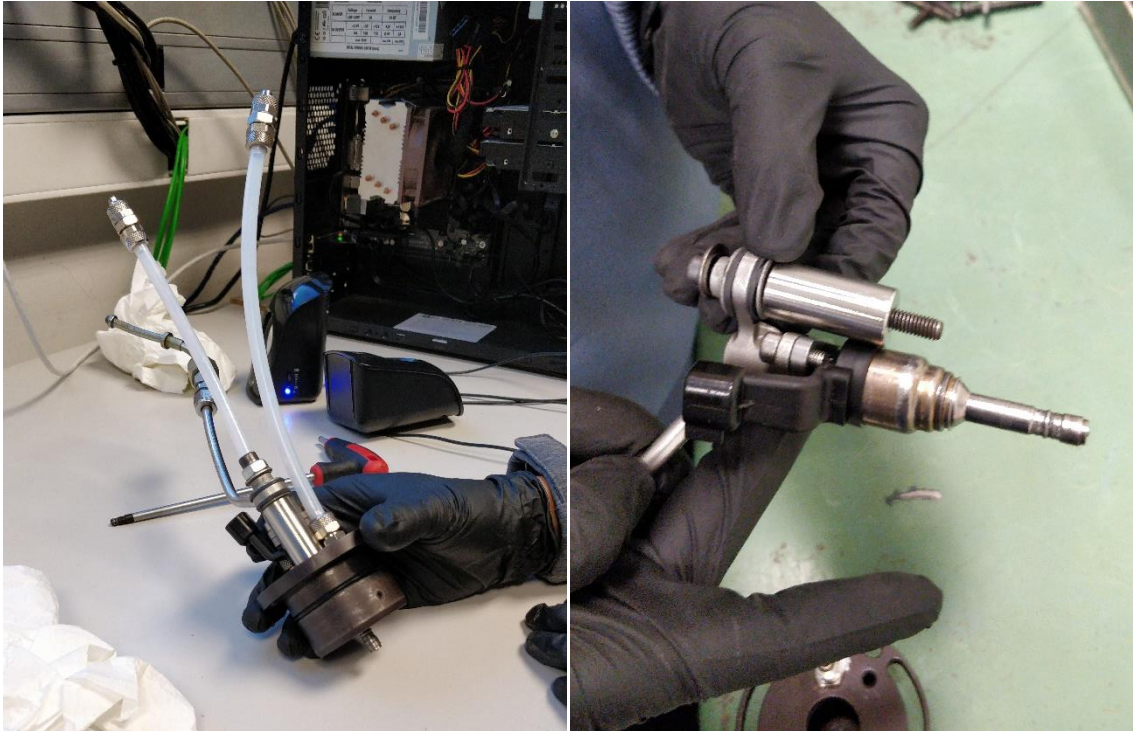


53. Segundo Common Rail. su objetivo es transmitir el combustible de manera uniforme y mitigar las ondas de presión. Tiene las siguiente tes partes de arriba abajo: conducto de salida al inyector, válvula de seguridad de presión, sensor de presión. Se observa en la parte inferior de la imagen el conducto de transmisión de combustible antes comentado. Fuente: Centro de Motores Térmicos (24/02/2020)

Este segundo común rail como se observa en la imagen 53 no está unido a la ecu, la válvula de seguridad está en caso de que se sobrepase la presión requerida para no dañar así el inyector.

### 4.3. Sistema de inyección experimental

El sistema de inyección es el más corto pero el más importante. Este sistema consta un grupo de piezas que forma un conjunto de ensamblaje quedando como un bloque en imagen 54. Forma parte de la maqueta añadiéndose o separándose de este y está unido a su vez con el segundo Common rail anteriormente comentado.



54. Sistema de inyección. es un conjunto que lleva las siguientes piezas: inyector, pieza de unión con la maqueta (lleva a su vez 2 juntas tóricas, 1 visible en la imagen y otra dentro), esta pieza esta agujereada para dejar pasar refrigerante, conductos comunicantes de refrigeración, bulón de fijación. Fuente: Centro de Motores Térmicos (03/03/2020)

Como se observa en la imagen 55 se ensambla tal como se ve para luego ser unido a la maqueta. Este compuesto por:

- **Inyector:** inyector “Spray G” de tipo solenoide de 8 agujeros simétricos.
- **Pieza de unión con la maqueta** Esta pieza esta agujereada para dejar pasar refrigerante. lleva además 2 juntas tóricas, 1 visible en la imagen y otra dentro
- **Conductos comunicantes de refrigeración**
- **bulón de fijación.**



55. Detalle del inyector con el conducto de unión al segundo Common rail. también se observa la conexión eléctrica del regulador del inyector. Fuente: Centro de Motores Térmicos (03/03/2020).

Para lograr que el fuel en el estudio de ensayo alcance una temperatura de hasta 120° es necesario que sea calentado y si se sobrepasa la temperatura que sea refrigerado adecuadamente. Lo más recomendable es calentar el fuel justo antes de que sea inyectado en la cámara para evitar pérdidas por calor durante el transporte del fuel hasta el inyector. La manera de calentar el inyector de puede observar en la imagen 56 se trata de una sección del portainyector en la que se ha trabajado unos conductos por donde pasa el líquido de refrigeración que baña la oquedad formada alrededor del inyector para calentar el fuel. El líquido refrigerante es calentado por una maquina regulatoria de temperatura y caudal, es por tanta un circuito cerrado en que va fluyendo y moviendo el líquido. Hay dos juntas tóricas arriba y abajo para que no se escape el líquido refrigerante.

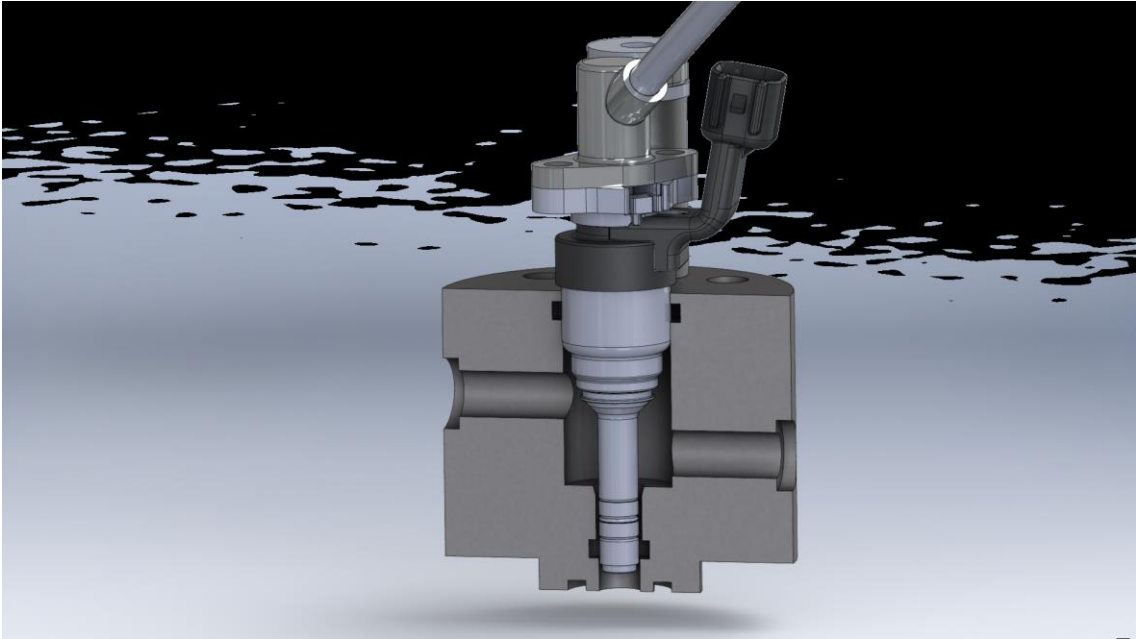
---

**Datos de entrada del sistema de inyección**

<b>Máximo cierre de la válvula de inyección (%)</b>	Al 15% para alcanzar 200 bares
<b>Revoluciones del motor (Hz)</b>	20

---

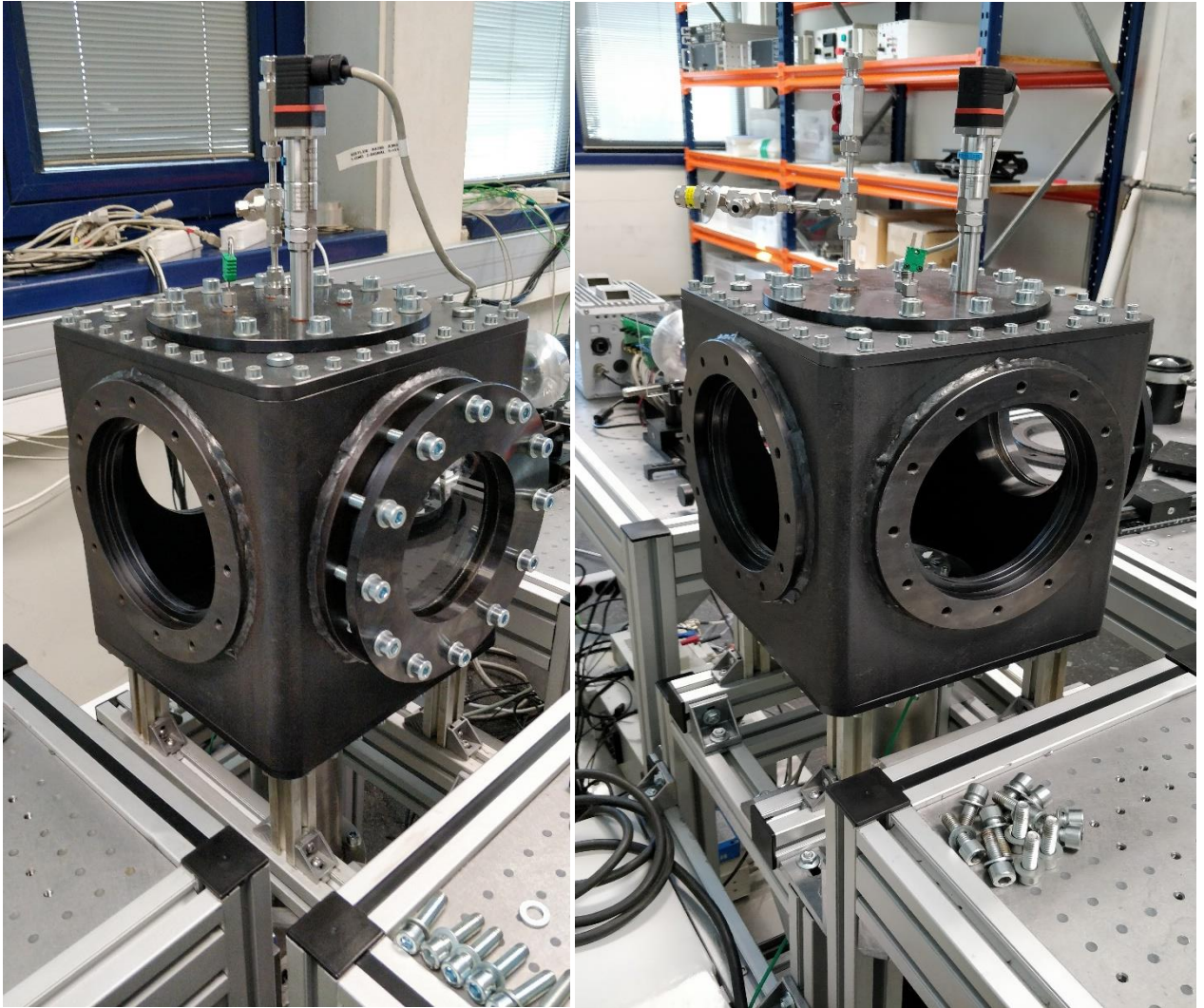
4.1. Datos de entrada del sistema de inyección. Fuente: Elaboración propia.



56. Vista de sección de diseño simulado tridimensional del inyector insertado en la porta inyector. en la porta inyector se ha trabajado unos conductos por donde pasa el líquido de refrigeración que baña la oquedad formada alrededor del inyector para calentar el fuel. Hay dos juntas tóricas arriba y abajo para que no se escape el líquido refrigerante. Fuente: Centro de Motores Térmicos.

#### 4.4. Maqueta de experimentación

La maqueta de experimentación es la pieza central del estudio donde se simula las condiciones que tendría un pistón de un motor. Es el lugar donde se podrá analizar y observar la salida del combustible por el inyector a volumen constante en imagen 57. Está fabricado de un material de acero AISI 1020 que soporta grandes presiones. Lleva un recubrimiento de templado y posterior pulido. Tiene forma de tetraedro y para poder ver el interior hueco lleva unos cristales reforzadores y de forma circular para soportar las presiones internas de la maqueta y así no haya ninguna esquina que pueda sufrir un concentrador de tensiones. Estos cristales también cumplen la función de que cuando se experimente dentro las cámaras puedan grabar el interior. A continuación, se indica que hay en cada una de las 6 caras de la maqueta empezando donde esta adosado el inyector:



57. Maqueta experimental. Fuente: Centro de Motores Térmicos (24/02/2020)

**1 cara lateral:** se encuentra el conjunto sistema de inyección. En esta cara se localiza el inyector.

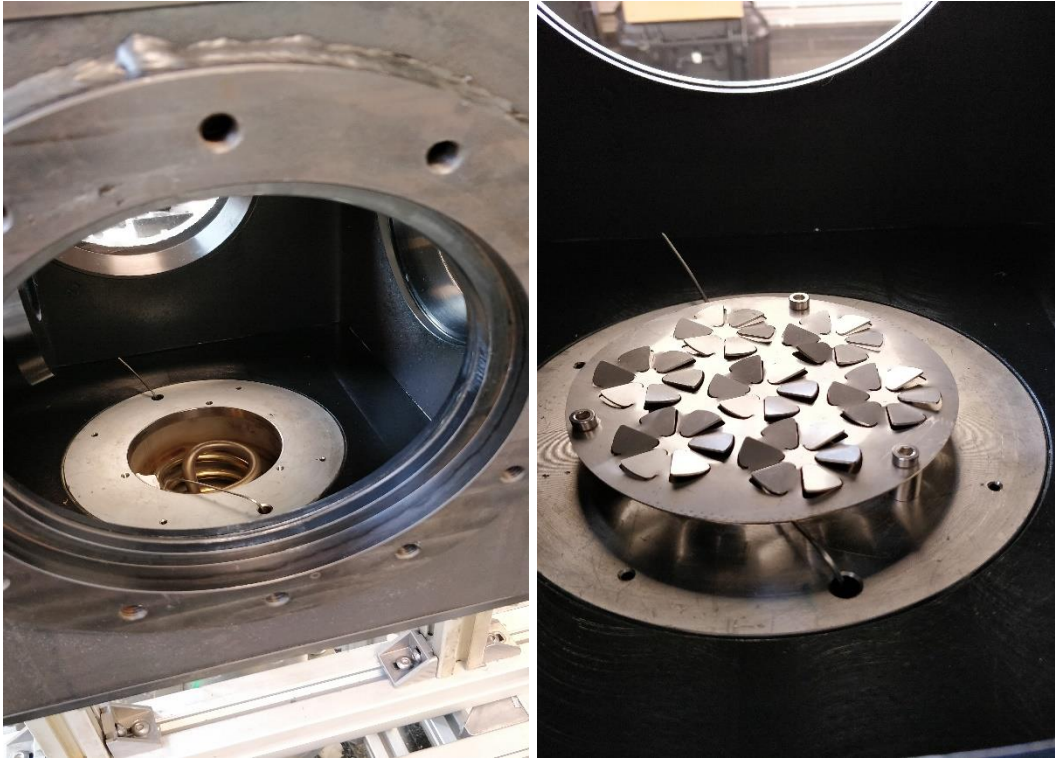
**2 cara lateral:** cristal reforzado.

**3 cara lateral:** cristal reforzado.

**4 cara lateral:** cristal reforzado.

**5 cara superior:** se encuentra los sensores de presión y temperatura.

**6 cara superior:** se encuentra la entrada de admisión de aire a la maquete. Lleva incluido una rejilla especial para dejar pasar el aire de forma uniforme y sin turbulencia. También esta situados la resistencia que sirve para calentar el aire y acondicionar o simular a las condiciones de un cilindro entre los 20 a 100° en imagen 58.



58. Detalles de la cara 6: resistencia de calor (Izquierda), rejilla (derecha). Fuente: Centro de Motores Térmicos (03/03/2020)

La maqueta está diseñada para soportar entre 0,5 a 15 bares de presión y entre 20 y 120°C de temperatura gracias a su geometría sin esquinas, los tornillos que unen las piezas y a las juntas tóricas. En caso de sobrepasar la presión límite hay una válvula de seguridad de presión que libera la presión.

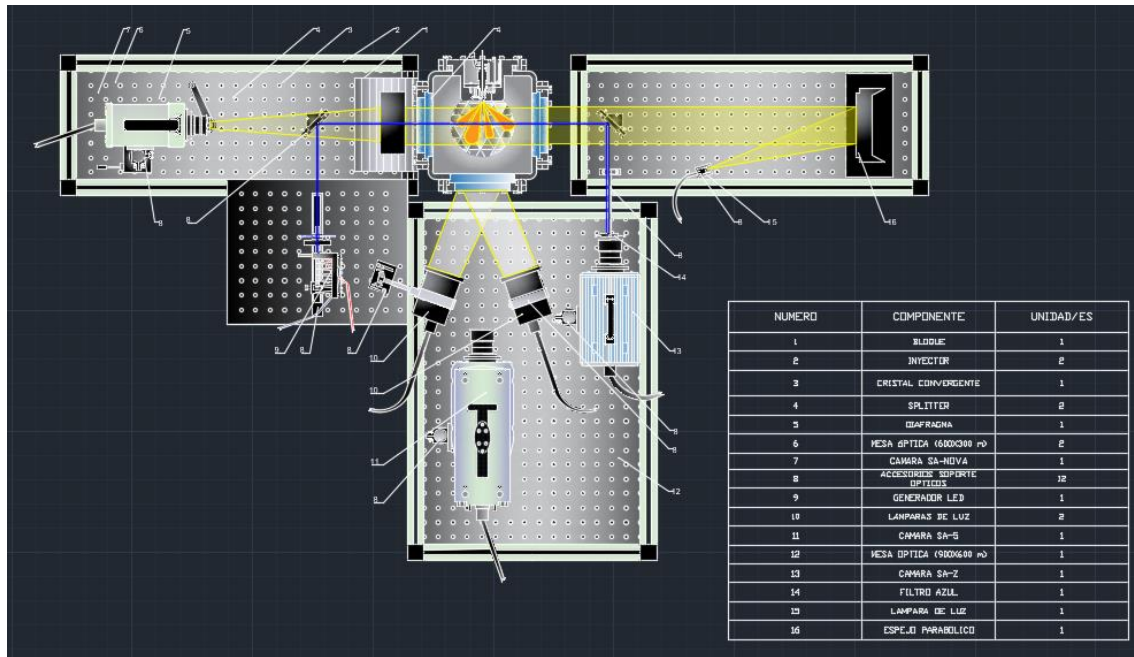
#### 4.5. Sistemas ópticos de visualización

El sistema óptico es una parte fundamental para el estudio y para la visualización del chorro dentro de la cámara de la maqueta. La idea principal es grabar a cámara lenta la proyección del chorro y forma de spray y posterior atomización en el entorno. La localización de los sistemas ópticos es apuntando a los cristales de la maqueta y se va a utilizar en este estudio las tres técnicas existentes de visualización que hay hasta ahora, que son:

- Técnica fotográfica *Schlieren* de un solo paso o estrioscopía
- Técnica fotográfica DBI (*Diffused Back Illumination*)
- Técnica fotográfica *Mie scattering*



Para una mejor comprensión al lector del sistema óptico, se ha procedido al diseño asistido por ordenador por el programa software AutoCAD® de la compañía propietaria Autodesk® en imagen 59. En el esquema se puede visualizar todos los componentes que está compuesto el sistema, así como un inventario del mismo. En el capítulo de anexos: Anexo C: Planos Descriptivos se puede el plano del diseño con más detalle.



59. localización y situación de los componentes que constituyen los sistemas ópticos. Diseño asistido por ordenador por el programa software AutoCAD® de la compañía propietaria Autodesk®. Fuente: Elaboración propia.

El fin que se persigue es poder analizar las variables de chorro principales y efectos de atomización que ya se han comentado en el capítulo 3 como son: penetración de chorro, ángulo de salida de los chorros en el caso de que sea multiorificio, distancia radial de penetración, entre otros. Estas variables no se pueden evaluar de primera mano, es necesario el método de *slow motion* y posterior postprocesado con el programa de software avanzado en matemáticas llamado Matlab.

El proceso de cámara lenta o *slow motion* consta básicamente en realizar un número de capturas por segundo superior a la velocidad de proyección. Se mide en fotogramas por segundo o *frames per second* [fps]. De esta manera se consigue capturar imágenes y fracciones por segundo que el ojo humano no es capaz de analizar tan deprisa.

El obturador o *shutter*<sup>vi</sup>, es una parte de la cámara que se encarga de controlar el tiempo que está el sensor expuesto a la luz.

<sup>vi</sup> Shutter: Término anglosajón. Señal de pulso que manda el inicio del ensayo

Se va a usar tres cámaras de alta velocidad de la marca *Photron*. Las tres disponen de unos objetivos 24 70 mm para un mejor enfoque y zoom. Además, para cada técnica tiene sus propios dispositivos y modos para captar toda la imagen.

Así es, la técnica DBI emplea los pulsos de un led para capturar mejor la imagen y unos *splitters* para desviar el led y así hacerse llevar a la cámara. Dicha técnica, la igual que las otras dos, se describirá más adelante.

Las tres cámaras enfocan desde puntos distintos en función de la empleabilidad en el estudio. En el caso del *Mie – Scattering* enfoca la cara frontal de la inyección, mientras que las técnicas *Schlieren* y DBI graban desde los laterales para ver el progreso del chorro y caracterizar la morfología del mismo.

A continuación, se indica en una tabla las características principales de cada técnica.

Técnica	Cámara	Fuente iluminación	Objetivos (mm)	Características de captura	Vista
<b>Schlieren</b>	Photron	Luz blanca	24-70	variación de densidades	Lateral
	Fastcam Nova SA-9			liquido - vapor	
<b>DBI</b>	Photron	LED azul	24-70	estado liquido	Lateral
	Fastcam SA5				
<b>MIE-Scattering</b>	Photron	Luz blanca	2-70	Estado liquido	Frontal
	Fastcam SA-Z				

#### 4.2. descripción cualitativa de las tres técnicas de empleo en este estudio.

Técnica	Cámara	Ratio fotogramas (fps)	Tiempo de obturador ( $\mu$ seg)	de Resolución
<b>Schlieren</b>	Photron Fastcam	30.000	25	512 x 512
	Nova SA-9			
<b>DBI</b>	Photron Fastcam	30.000	2,47	389 x 376
	SA5			
<b>MIE-Scattering</b>	Photron Fastcam	30.000	7,5	512 x 448
	SA-Z			

#### 4.3. Configuración técnica y cuantitativa de las cámaras que se emplean.

También se describe los parámetros que emplea al LED para su funcionamiento

Dispositivo	Voltaje	Ancho de pulso ( $\mu\text{s}$ )	de Delay ( $\mu\text{s}$ )	Filtro
LED	Photron Fastcam Nova SA-9	1	0.5	Azul

#### 4.4. Configuración cuantitativa del LED que se emplea en la técnica DBI.

A continuación, se describe cada una de las técnicas.

#### 4.5.1. Técnica Schlieren

La técnica *Schlieren* es un procedimiento fotográfico muy empleado para caracterizar la penetración de chorros y variación de densidad de los fluidos. Utiliza el efecto Schlieren, creado por el físico alemán August Toepler en 1864 se basa en la desviación de la luz por un gradiente del índice de refracción. Como ya se indicó, la localización de la cámara es lateral a la maqueta en imagen 60.

El funcionamiento es el siguiente (ver imagen 59 para una mejor descripción visual)

El camino óptico comienza con la fuente de luz puntual, que está conectada a una fibra óptica. La luz pasa por la fibra óptica hasta un enfocador, donde se expande hasta llegar al espejo parabólico, cuyo propósito es desviar la luz y redirigirla a la zona de pruebas. Los haces de luz pasan por una primera lente para que viajen paralelos entre sí y se reflejen dentro de la maqueta. Los haces están sujetos a ser desviados de su trayectoria original por gradientes de densidad en la trayectoria recorrida. Los rayos de luz que encuentran el combustible de los aerosoles, ya sea en fase líquida o de vapor, se desviarán de su camino original proporcionalmente al índice de refracción del medio en el que entran. En el trabajo realizado por [73] encontraron una relación lineal entre el índice de refracción y la densidad del gas en ecuación (10),

$$n - 1 = k_{GD} * \rho \quad (10)$$

Donde  $n$  es el índice de refracción,  $\rho$  es la densidad del gas y  $k_{GD}$  es el coeficiente de Gladstone-Dale.

También se parametriza el ángulo de deflexión  $\varepsilon$  en ecuación (11)

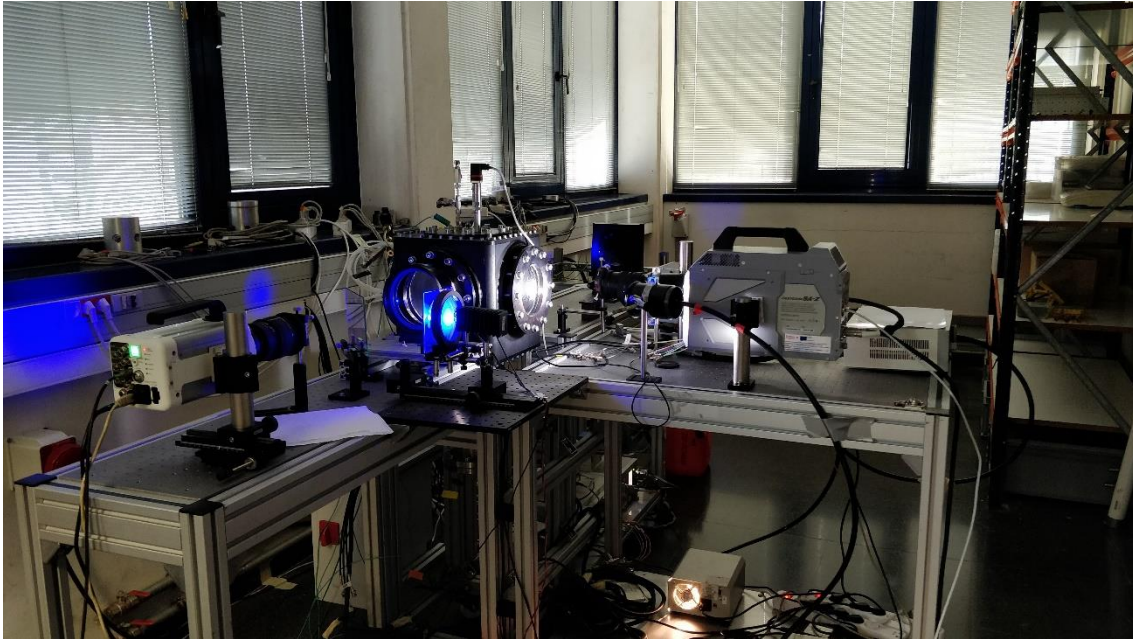
---

$$\varepsilon_x = \frac{L}{n_0} \frac{\theta n}{\theta x}, \varepsilon_y = \frac{L}{n_0} \frac{\theta n}{\theta y} \quad (11)$$

Donde L representa la longitud del camino óptico y  $n_0$  el índice de refracción del entorno. A partir de las ecuaciones (10) y (11), existe una relación clara entre los cambios en la densidad y la desviación angular de los rayos de luz, que se puede visualizar a través de imágenes Schlieren.

Aguas abajo del recipiente, la luz pasa por otra lente de 400 mm de distancia focal que enfocará la luz de regreso a un punto. En la posición donde se forma el punto (longitud focal de la lente A), se monta el dispositivo de corte de gráficos de sombra. En este caso, se ha seleccionado un dispositivo de corte de patrón circular, ya que corta la luz desviada de manera simétrica. El dispositivo de corte o diafragma es una parte crítica del experimento porque proporciona un control directo de la sensibilidad de la técnica. Justo después del diafragma, la cámara de alta velocidad graba la imagen formada en la configuración. La imagen estará compuesta de zonas negras que representan la luz que ha sido desviada por el rociado y descartada en el dispositivo de corte, y zonas más claras que representan el fondo de las imágenes donde la luz no se ha desviado (o desviado lo suficiente) y recogido en la cámara [1][71].

Existen dos tipos de configuraciones más comunes, de paso único y de doble paso. La diferencia radica en que la primera configuración se usa para boquillas de orificio único perforadas axialmente, donde los recipientes ópticos con acceso múltiple permiten la visualización de la línea de visión. Por el contrario, la configuración de doble paso se aplica comúnmente para boquillas de múltiples orificios, donde los aerosoles tienden a visualizarse a través de un único acceso óptico. Es decir, la luz cruza la sección de prueba dos veces, y la sensibilidad óptica aumenta teóricamente en un factor de dos [71].



60. Fotografía donde se ven las tres técnicas aplicadas listas para los ensayos. Fuente: Elaboración propia (10/03/2020).

#### 4.5.2. Técnica DBI

La técnica DBI se emplea para la visualización y evaluación de la penetración de fluidos. A diferencia de la anterior técnica que usa luz blanca como iluminación, este usa un LED para refractar las partículas líquidas en imagen 60. También otra diferencia que ya se ha enunciado es que esta técnica captura la morfología del chorro en estado líquido. El funcionamiento es el siguiente (ver imagen 59 para una mejor descripción visual). Un pulso de luz de 1  $\mu$ s de ancho es emitido por un LED azul diseñado a propósito. Hay que tener en cuenta que la resolución del fotograma va a depender del ancho del pulso. El pulso luego pasa a través de un difusor plano y una lente para obtener una luz difusa lo suficientemente amplia como para cubrir el área de prueba completa. Después, el pulso impacta en el primer *splitter* de sensibilidad 50 \ 50 (transparencia \ reflectividad) que redirige el pulso hacia el interior de la maqueta. Cuando los pulsos alcanzan la atomización, se producen tres posibilidades distintas:

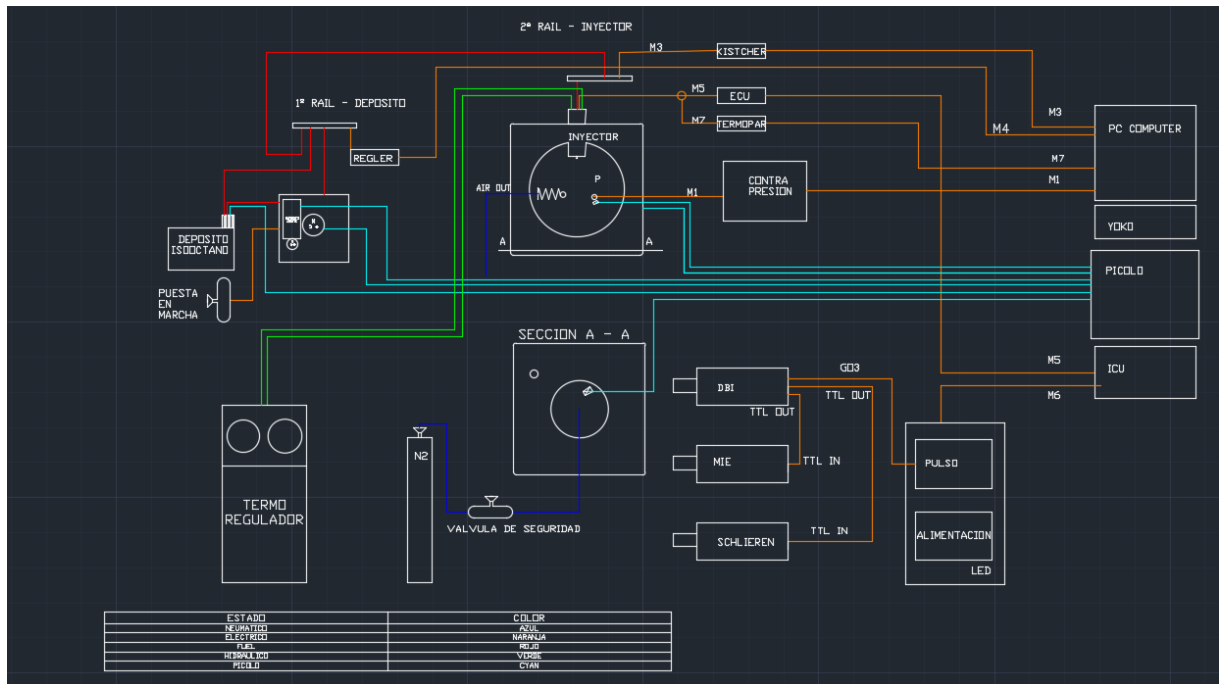
- Por un lado, la luz se encontrará en su camino con el combustible pulverizado en fase líquida y, por lo tanto, se bloqueará
- Por otra parte, la luz se encontrará con la fase de vapor de los aerosoles y se desviará y atenuará ligeramente,
- Otra posibilidad, la luz pasará a través de una zona donde solo está presente el gas ambiental, en ese caso, no será perturbado.

Después de pasar el haz de luz por la zona de la maqueta de prueba y por la ventana, el *splitter* B refleja los pulsos de luz a la cámara de alta velocidad, donde se graban las imágenes formadas en el experimento. Las imágenes capturadas por la cámara son básicamente imágenes en las que la fase líquida del aerosol aparece oscura y el fondo y la fase de vapor aparecen en blanco o gris claro.

El motivo del empleo de un LED azul como fuente de iluminación en imagen 60, es que proporciona flexibilidad al descartar los rayos de luz de otras configuraciones ópticas que podrían interferir con la medición.

## **4.6. Sistema de regulación control y sensores**

En esta sección se van a indicar y describir brevemente cuales son los aparatos o dispositivos que regulan y controlan a los sistemas anteriores para que el funcionamiento sea correcto. Además, este sistema gobierna sobre el resto de sistemas comentados con señales eléctricas y electrónicas, por tanto, se encuentran localizados alrededor de la zona de estudio. En la imagen 61 se observa el esquema de las diferentes conexiones que se han empleado, los equipos de control y los sensores. En colores se ha descrito los distintos estados de comunicación (hidráulica, neumática, eléctrica). El diseño es asistido por ordenador por el programa software AutoCAD® de la compañía propietaria Autodesk®



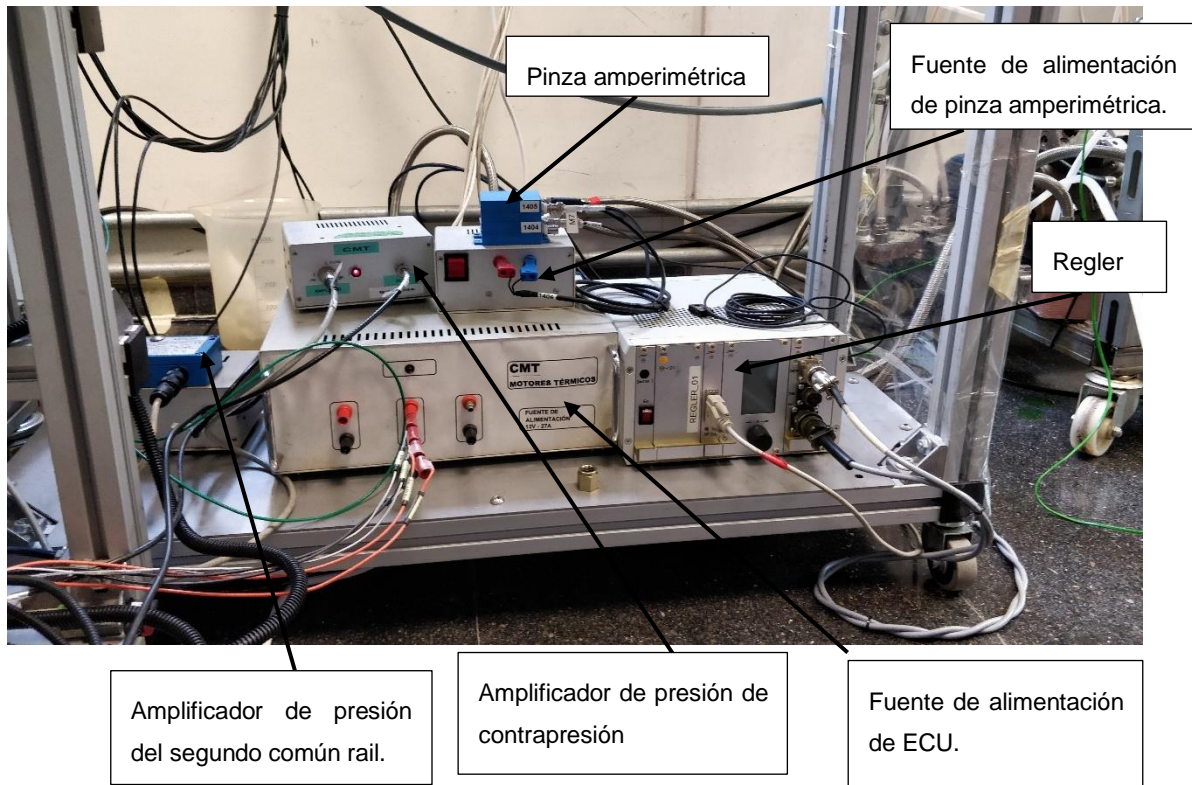
61. Esquema Representativo de las conexiones que hay entre los equipos de gobierno y control con los de actuación y potencia. En colores se representa los diferentes estados de comunicación (Hidrúlica, neumática, eléctrica). Fuente: Elaboración propia.

Las señales eléctricas y electrónicas de gobierno son traducidos en movimiento por electroválvulas y actuadores.

Los aparatos y dispositivos electrónicos que van a ser descritos forman parte del centro de motores térmicos (CMT) donados para colaboración para experimentos de investigación como es para este estudio.

#### 4.6.1. Equipos de gobierno y control de información

A continuación, se explican cuáles son los equipos de gobierno que regulan el ensayo y que funciones hacen cada uno. En la imagen 62 se observa la localización de ellos y se nombran



62. Localización y nombramiento de los equipos de gobierno. Fuente: Elaboración propia (13/03/2020).

**Amplificador de presión del segundo común rail:** gobierna y evalúa la presión la presión del común rail de inyección a través del sensor de presión. Estas señales eléctricas están comunicadas por cables de tipo coaxial hasta el ordenador.

**Amplificador de presión de contrapresión:** gobierna y parametriza el sensor de presión de la maqueta. Estas señales eléctricas están comunicadas por cables de tipo coaxial hasta el ordenador.

**Regulador de presión de inyección del primer rail o regler:** gobierna la presión del primer común rail. Controla la electroválvula que actúa en la entrada del rail antes de pasar por el siguiente rail.

**Pinza amperimétrica de intensidad:** Mide la intensidad eléctrica que le manda la ECU al inyector. Estas señales eléctricas están comunicadas por cables de tipo coaxial hasta el ordenador.

**Unidad de Control (ECU):** es el cerebro de la maqueta de ensayo. Controla, parametriza y gobierna los pulsos y la cantidad de presión al inyector, exactamente al solenoide que hace mover la aguja del inyector tal y como ya se ha comentado. Estas señales eléctricas están comunicadas por cables de tipo coaxial hasta la ICU que ya se comentara. A su vez este está conectado al ordenador.



**Switch:** dispositivo que comunica las señales que llegan de las tres cámaras con el ordenador. Estas señales viajan por red local Ethernet a través de cables de red.

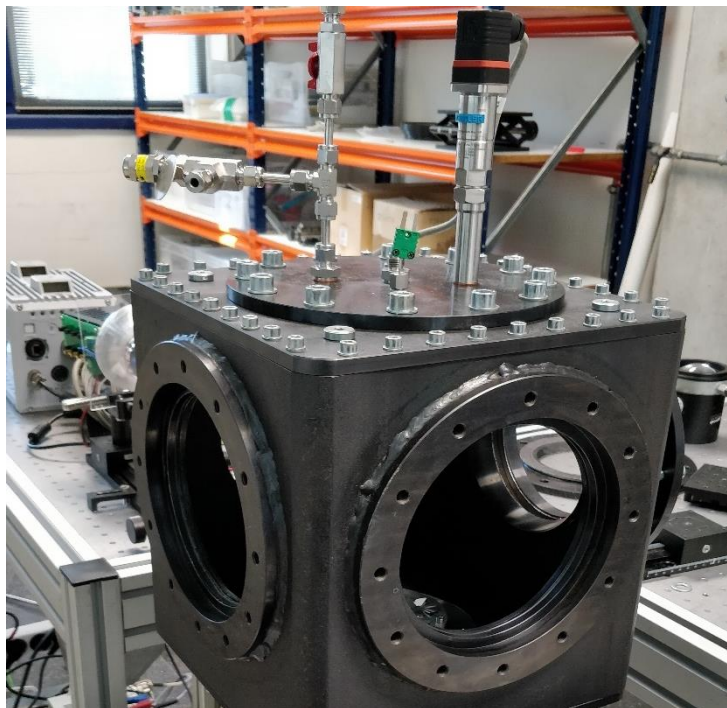
**Termopares:** son transductores que miden la temperatura en un punto o zona en imagen 63. Están formados por la unión de dos metales distintos que produce una diferencia de voltaje en función de la diferencia de temperatura entre uno de los extremos denominado unión caliente y otro extremo unión fría. Los cables de transmisión son tipo k. los termopares están situados en los lugares en los que es necesario el control de la temperatura, como son:

Para el sistema de alimentación de combustible

- Depósito para la bomba de aceite.
- Depósito de combustible.
- Bomba de combustible

Para la maqueta

- Parte superior interna de la maqueta
- Parte inferior interna de la maqueta (entre el conducto de entrada de nitrógeno y el regulador de turbulencias).
- Entrada de nitrógeno (parte inferior de la maqueta)



63. ejemplo de situación y localización de un termopar. termopar de control de la parte superior interna de la maqueta. Fuente: Elaboración propia (21/02/2020).

### 4.6.2. Aparatos de control

**Unidad de Control de Inyección (ICU):** esta unidad de control gobierna y sincroniza el pulso del LED y la ECU. Recibe y emite las señales del ordenador a los dispositivos que gobierna. Además, el ICU lanza el *trigger* o señal al ECU, la longitud de señal es de 680  $\mu$ s.

**Yoko:** este aparato visualiza todas las presiones de control. Recibe las señales llegadas de los aparatos de amplificación de presión y contra presión. Estas comunicaciones también se transmiten por cables de tipo coaxial.

## 4.7. Sistema de control asistido por ordenador

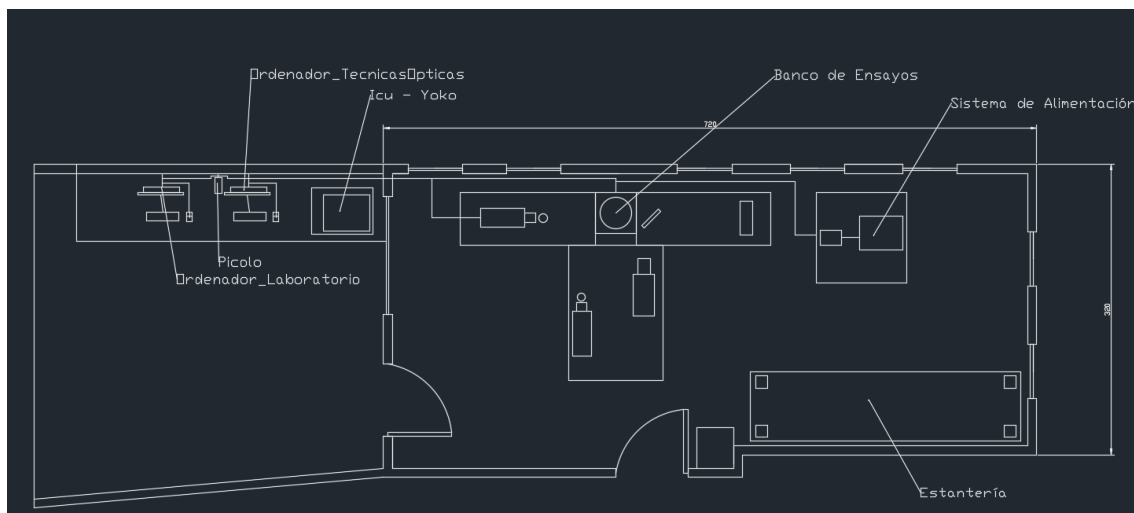
El ordenador es el vínculo que hay entre los aparatos que emiten las señales para la maqueta y el ser humano.

Para este estudio experimental se van usar dos ordenadores donados por la universidad Politécnica de Valencia UPV para realizar estudios de investigación. Estos ordenadores tienen estudios específicos:

- **Ordenador CMT 402:** es específico para técnicas de laboratorio. Exactamente se usan los siguientes programas para el control de:
  - Pulso de señal *Trigger*<sup>vii</sup>
  - Visualización de las temperaturas
  - Control de la presión de inyección
- Los programas que se utilizan son
  - *Picoloc:* para el control de las temperaturas. De emplea un aparato donde se comunican todos los termopares y por USB se transmite la información al ordenador
  - *Regler:* de procedencia alemana. Desde este programa se gobierna el trigger que se le envía al ecu y a su vez, por pulso electrónica, al inyector.
  - *WinDiv:* es un programa del cual se puede controlar la señal que manda la puesta en marcha del ensayo.

---

<sup>vii</sup> **Trigger:** Es un pulso de señal que sirve para dar comienzo siempre al ensayo



64. Esquema de la localización de los ordenadores en la sala paralela de la sala de ensayos

- **Ordenador CMT 486:** es específico para técnicas ópticas. Se emplea para la visualización y grabación de las inyecciones experimentales de estudio en la maqueta.
  - Los programas que se utilizan son:
    - *Photron:* es un programa específico para las cámaras de alta velocidad que se emplean. En el programa se configura las cámaras como es la resolución, fps, el tiempo de obturación, posición al inyector, claridad u oscuridad y más funciones.

#### 4.8. Metodología de procesamiento de datos e imágenes del spray de chorro de estudio

Tras la realización y construcción de todo el equipo experimental, como el sistema de alimentación y bombeo del fuel, el sistema de inyección, sistema de control y gobierno, tal y como ha sido descrito anteriormente, así como la localización y ajuste de los sistemas ópticos, indicando las tres técnicas que se van a utilizar y el tipo de cámaras de uso, se puede proceder a la grabación y captación de las inyecciones de estudio.

No obstante, antes de realizar las pruebas hay que conocer cómo se va a realizar el posterior procesamiento o postprocesamiento de datos, es decir, traducir las imágenes obtenidas a datos para que luego sean más fácil de interpretar.

Para el empleo del postprocesamiento se utiliza el programa de software avanzado en matemática Matlab.

La descripción del postprocesamiento se puede ver y encontrar en la mayoría de tesis de dedicación a este estudio. Es por eso que se ha seguido la Tesis Doctoral de Daniel Vaquerizo Sánchez titulada “Study on Advanced Spray-guided Gasoline Direct Injection Systems” y publicado por la Universidad Politécnica de Valencia en el año 2017 [1].

#### 4.8.1. Procesamiento de imágenes

El procesamiento de las imágenes es una de las partes más importantes de cualquier análisis de datos de visualización. El procesamiento de todas las imágenes se ha realizado utilizando un algoritmo desarrollado internamente en el que el procesamiento general de las imágenes es independiente del tipo de técnica utilizada para capturarlas. No obstante, dada la diferencia en los experimentos y, por lo tanto, en las imágenes obtenidas, se utiliza un algoritmo de preprocesamiento antes del algoritmo de procesamiento general para adaptar los diferentes tipos de imágenes. La estrategia utilizada en el preprocesamiento de las imágenes es la siguiente:

**1. Sustracción de fondo.** El código de preprocesamiento prepara el fondo de la imagen y lo sustrae para generar imágenes donde la luminosidad mínima de la escena se normaliza a cero.

En la técnica DBI, donde los cambios en la densidad del ambiente no se reflejan en las imágenes capturadas, el fondo se considera estático. Para el caso estático, un promedio simple de las primeras imágenes (antes del evento de inyección) es suficiente para preparar el fondo para extraer (se usaron 8 imágenes).

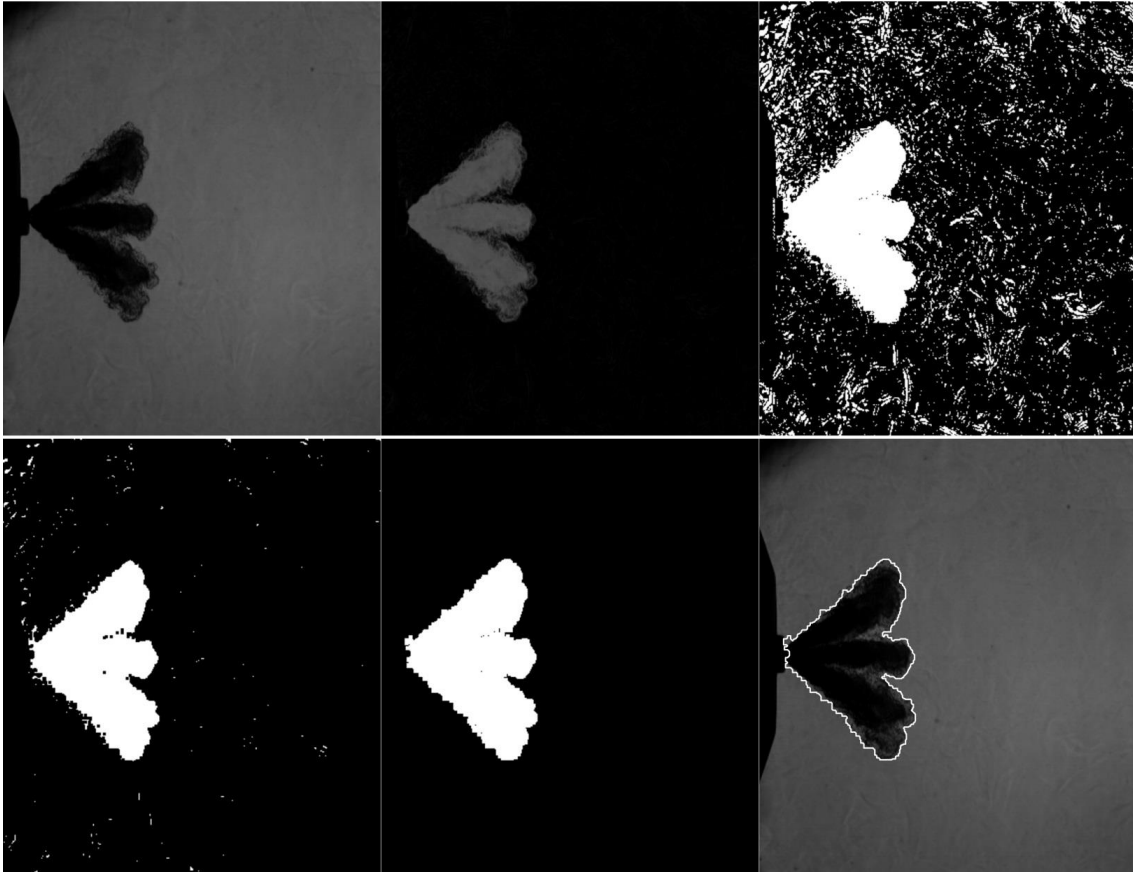
En el caso de Schlieren, donde los gradientes de densidad se hacen visibles, el movimiento del gas ambiental en el fondo de la imagen es notable, lo que crea la necesidad de calcular un nuevo fondo (dinámico) para cada imagen. En el caso dinámico, el fondo se calcula en dos pasos: primero, se toma todo lo de la imagen anterior que no se detectó como rocío y se coloca en el mismo lugar en la imagen actual; y segundo, se toma la parte de la imagen anterior donde se detectaron los aerosoles y se llena con las posiciones correspondientes del fondo generado con el promedio de las primeras 8 imágenes (el fondo estático) (ver imagen 65).

**2.Cálculo del umbral.** Para detectar el contorno del spray en el algoritmo de procesamiento, es necesario crear una imagen binaria (blanco y negro), donde la parte blanca es el spray detectado y la parte negra es el resto. Se debe determinar un umbral para crear la imagen binaria. Por lo tanto, el umbral es un valor de intensidad de luminosidad que representa la barrera de la atomización y el fondo. Hay muchas formas de calcular el umbral para realizar la binarización. Se han utilizado dos métodos en este trabajo según el tipo de técnica.

Para DBI, se ha realizado un enfoque que utiliza un umbral de espesor óptico, ya que es el estándar dentro del grupo ECN, la metodología utilizada se discute en, y consiste en calcular la extinción de las imágenes con respecto al fondo ( $\log I / I_0$ ) y considerando la extinción debajo de cierto valor como líquido y el resto como fondo.

Para los experimentos de Schlieren, se seleccionó un enfoque fijo. En el enfoque fijo, el umbral de intensidad se calcula como un porcentaje constante (3.5%) del rango dinámico de la imagen.

Una vez que el código de preprocesamiento ha terminado con las imágenes, éstas se pasan al código de procesamiento para su binarización y limpieza. La binarización se realiza simplemente aplicando el umbral calculado en el paso anterior. Dado que las imágenes originales no son perfectamente homogéneas y algunas zonas en el fondo pueden aparecer más iluminadas, las imágenes y sectores binarios resultantes no representan perfectamente los aerosoles y es necesario limpiarlos. Se aplica una erosión de imagen binaria a las imágenes para desconectar las áreas de píxeles blancos que están conectadas por menos de 2 píxeles (conectividad). Una vez que se realiza la erosión, se aplica un filtro de mínima área que elimina cualquier área que contenga menos de un número establecido de píxeles, por último, se realiza una dilatación de imagen binaria para restaurar la superficie de las zonas blancas restantes a su tamaño original.



65. Ejemplo de procesamiento de imágenes para una imagen de Schlieren. Se visualiza en las imágenes la descripción en las líneas superiores del procesamiento de imágenes. Arriba a la izquierda, imagen original. Centro superior, original con fondo sustraído. Arriba a la derecha, binarización en bruto. Abajo a la izquierda, filtro de erosión aplicado. Centro inferior, área mínima y filtros de dilatación aplicados. Abajo a la derecha, imagen original con contorno detectado superpuesto. Fuente: [1].

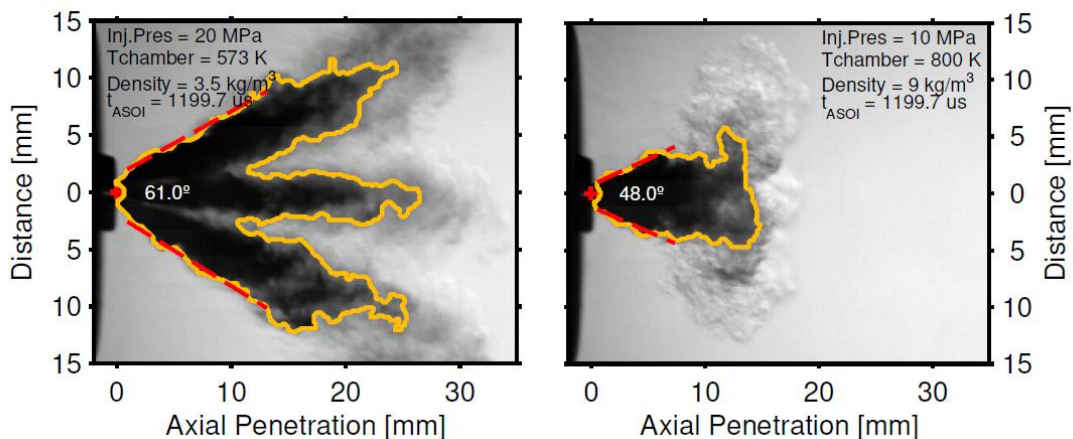
La figura 65 muestra gráficamente los pasos descritos anteriormente. Arriba a la izquierda presenta la imagen original que se procesará, el centro superior muestra la imagen con el fondo sustraído, arriba a la derecha es el resultado de la binarización con el umbral calculado. Una vez que se ha realizado la binarización, la parte inferior izquierda presenta la imagen con el filtro de erosión aplicado, mientras que el centro inferior muestra la imagen con el área mínima y los filtros de dilatación. Por último, la parte inferior derecha muestra la imagen original con el contorno detectado superpuesto.

#### 4.8.2 Procesamiento del contorno

Después de que los algoritmos de procesamiento de imágenes detectan el contorno de los aerosoles, estos contornos pasan a los códigos de procesamiento posterior para extraer los resultados. Los dos resultados principales que generalmente se pueden extraer de los experimentos realizados son la penetración y el ángulo de atomización.

La penetración se extrae seleccionando el punto más alejado del contorno de atomización, tomando solo la distancia axial a la boquilla.

El ángulo es una medida difícil de determinar dada la dificultad de extraer resultados representativos debido a la alta dependencia de la definición utilizada. En el caso del contorno de fase líquida extraído con la técnica DBI, la principal fuente de incertidumbre es que existen ciertas condiciones en las que la forma del rociado no es completamente cónica (o triangular si se observa desde un lado) y las líneas que componen El contorno exterior puede ser redondeado.

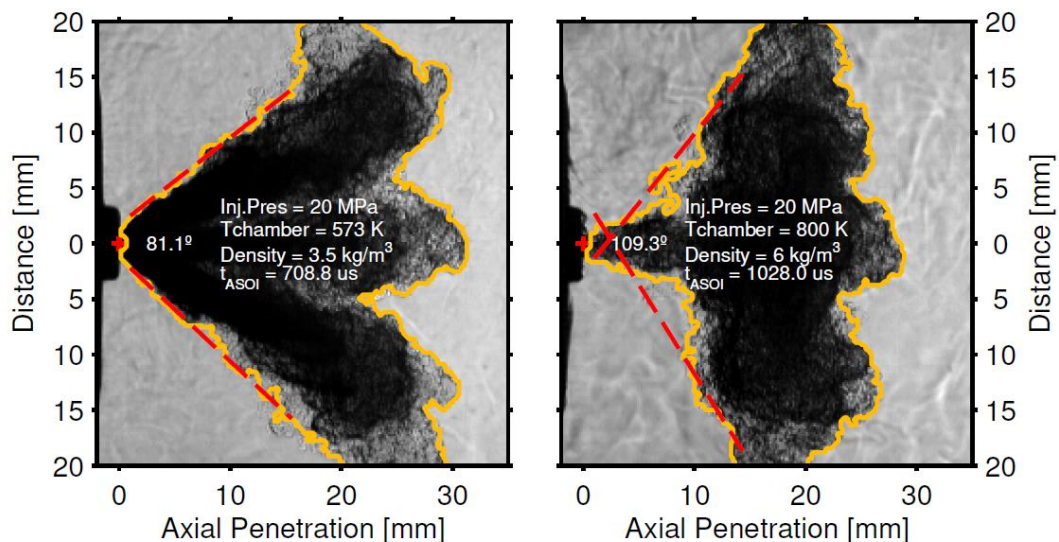


66. Imágenes DBI a diferentes condiciones de temperatura y densidad con los contornos detectados superpuestos para mostrar la metodología de determinación del ángulo. Fuente: [1].

La figura 66 muestra dos imágenes diferentes de experimentos DBI con el contorno detectado superpuesto, el ángulo calculado trazado con líneas discontinuas y las condiciones de inyección dadas en las imágenes. El ángulo se ha calculado realizando un ajuste de mínimos cuadrados con las partes inferior y superior del contorno. Se puede observar la gran diferencia entre la forma de los contornos de las dos imágenes. En la imagen del lado izquierdo, donde la temperatura y la densidad son más bajas, la forma externa del contorno se puede aproximar con un triángulo. Sin embargo, en el caso del lado derecho, la parte externa del contorno es más redondeada e irregular. Esto crea la necesidad de establecer el límite final del contorno utilizado para el ajuste no muy lejos, mientras que el límite inicial debe colocarse muy cerca de la boquilla (para evitar líneas paralelas si no se tiene en cuenta la primera parte de la atomización). Los límites que se usaron después de la consideración fueron del 1% al 50% de la penetración de la atomización axial. La imagen del lado derecho de la figura 66 muestra la dificultad y la incertidumbre que se pueden encontrar al calcular los ángulos utilizando la fase líquida capturada mediante la técnica DBI.

Para el caso del vapor, la figura 67 presenta la misma información extraída de las imágenes de *Schlieren*. En este caso, la condición de baja densidad en el lado izquierdo de la figura muestra cómo el mismo método aplicado en la figura 66 también puede funcionar para la visualización de *Schlieren*. Sin embargo, el caso del lado derecho con un valor de densidad más alto (pero no tan alto como la imagen del lado derecho de la figura 66) muestra un contorno lo suficientemente diferente hasta el punto de no poder aplicar una definición de ángulo que pueda describe adecuadamente el fenómeno. Esta imagen presenta un cono de atomización delgado al principio cerca de la boquilla, pero luego se expande rápidamente a un contorno de forma ovalada, lo que hace que el ángulo calculado no tenga sentido. Dado que el ángulo no describe la primera zona o la segunda zona, el valor calculado no describe la forma del contorno y, por lo tanto, no tiene ninguna relación con los fenómenos que tienen lugar.

Este fenómeno que ocurre a densidades moderadas y también puede ocurrir a densidades más bajas ( $3.5 \text{ kg/m}^3$ ) en momentos posteriores después del inicio de la inyección (ASOI), ha hecho incompatibles todas las definiciones probadas con la fase de vapor de la atomización y consecuentemente ha causado que no los ángulos de atomización de la fase de vapor se muestran en el trabajo actual. Este es un ejemplo de la importancia de que más estudios de aerosoles GDi describan de manera adecuada y precisa el desarrollo del combustible durante y después del evento de inyección.



67. Imágenes de *Schlieren* a diferentes condiciones de temperatura y densidad con los contornos detectados superpuestos para mostrar la metodología de determinación de ángulo para la fase de vapor. Fuente: [1].



Se han obtenido diez repeticiones para cada una de las condiciones. Las repeticiones son procesadas individualmente por los algoritmos de procesamiento de imágenes y los resultados obtenidos por el procesamiento de contorno se promedian utilizando una estrategia de promedio móvil. El procedimiento se puede resumir de la siguiente manera:

1. Se consideran los datos dentro del intervalo  $t_i \pm \Delta t / 2$ , donde  $t_i$  es el tiempo instantáneo y  $\Delta t$  es la ventana de tiempo seleccionada ( $9 \mu s$  para todos los experimentos).
2. Usando los datos seleccionados en el intervalo, se realiza un ajuste lineal y el valor promedio  $\hat{y}$  se evalúa calculando  $f(t_i)$ , donde  $f(t)$  es la ecuación obtenida para el ajuste.
3. El algoritmo se repite moviendo  $t_i$  con un cierto paso seleccionado a través del tiempo completo de cada conjunto de datos.



## Capítulo 5

---

# 5. Resultados

---

En este capítulo se va a visualizar los resultados obtenidos de los ensayos experimentales que se ha estado explicando en los capítulos anteriores. Primeramente, se describe los puntos de ensayo experimental que han sido sujeto de estudio. Se explicará porque se han elegidos esos puntos y que información proporción.

Con los ensayos ya ejecutados, se explica también que metodología se ha seguido para extraer los datos. Hay que saber que de los ensayos se obtienen imágenes de video con las cámaras lentas de alta resolución en el que ya se han explicado el método de captación (Sección 4.5 Sistemas ópticos de visualización). Básicamente, se emplea softwares matemáticos avanzados como vínculo entre las imágenes de video y la extracción de datos. En la sección 4.8 Metodología de procesamiento de datos e imágenes del spray de chorro de estudio ya se ha dejado explicado la metodología para el procesamiento de las imágenes. En esta sección se va a completar el método con la extracción de los resultados.

Con los datos ya extraídos, esa información se tiene que poder visualizar para que sea fácil de comprender y manejar. En esta importante sección se utiliza también programas de software matemáticos avanzados. Con la visualización de datos se comentará y se explicará desde punto de vista objetivo. En esta sección también se comparará los datos ya visualizados con otros textos y tesis con la finalidad de corroborar y dar credibilidad

a los resultados. Se añadirá imágenes de video de los ensayos para situar al lector en el momento de los ensayos.

## 5.1. Puntos de Ensayo Experimental

Los puntos de ensayo son las diferentes condiciones a las que se somete el fuel experimental, así como la cámara experimental. Estas condiciones son después estudiadas. Por eso, se establecen unos intervalos entre los parámetros de estudio porque son esenciales para la investigación.

Los puntos que han sido estudiados, y que se ven a continuación, fueron ensayados desde otra línea de investigación experimental distinta a la descrita en los capítulos anteriores. Esto quiere decir, el capítulo en el que nos encontramos de resultados no se ha recogido los puntos de ensayo con la descripción de la maqueta de estudio de este trabajo. Entre las diferencias importantes destaca la diferencia de técnica óptica. Mientras que en este estudio emplearía las tres técnicas explicadas como son, técnica DBI, técnica Schlieren y la técnica MIE; en el estudio de donde se han obtenido los resultados se utilizó la técnica DBI.

Otra diferencia importante es la diferencia de inyector. Para el estudio de este trabajo se iba a emplear el inyector Spray G en colaboración con la red interuniversidades ECN<sup>viii</sup> [41] en cambio, para el otro estudio experimental se utilizó el Spray TME también de ECN.

Puntos	Fuel	Camera (Técnica)	P_back (bar)	P_inj (bar)	T_fuel (°)	T_amb (°)	Densidad (Kg/m3)
01	Isooctano	Photron (DBI)	3	100	90	25	12
02	Isooctano	Photron (DBI)	3	200	90	25	12
03	Isooctano	Photron (DBI)	3	280	90	25	12
04	Isooctano	Photron (DBI)	6	100	90	25	24
05	Isooctano	Photron (DBI)	6	200	90	25	24
06	Isooctano	Photron (DBI)	6	280	90	25	24

<sup>viii</sup> ECN: por sus siglas en ingles Engine Combustion Network

07	Isooctano	Photron (DBI)	10	100	90	25	40
08	Isooctano	Photron (DBI)	10	200	90	25	40
09	Isooctano	Photron (DBI)	10	280	90	25	40
10	Isooctano	Photron (DBI)	0.5	100	90	25	2
11	Isooctano	Photron (DBI)	0.5	200	90	25	2
12	Isooctano	Photron (DBI)	0.5	280	90	25	2
16	Isooctano	Photron (DBI)	1	100	90	25	4
17	Isooctano	Photron (DBI)	1	200	90	25	4
18	Isooctano	Photron (DBI)	1	280	90	25	4

5.5.1. puntos de ensayo experimental. Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se describe el significado de las columnas:

**Puntos:** se corresponde a los puntos de estudio de ensayo experimental.

**Fuel:** tipo de fuel empleado.

**Técnica óptica:** se trata del tipo de cámara y la técnica óptica que se ha empleado.

**P\_back:** es la presión que hay en la cámara

**P\_inj:** es la presión de inyección del inyector que se le somete al fuel.

**T\_fuel:** es la temperatura que tiene el fuel en el momento de ser inyectado.

**T\_amb:** es la temperatura que se encuentra en la cámara experimental.

**Densidad:** es la densidad que se encuentra en la cámara experimental.

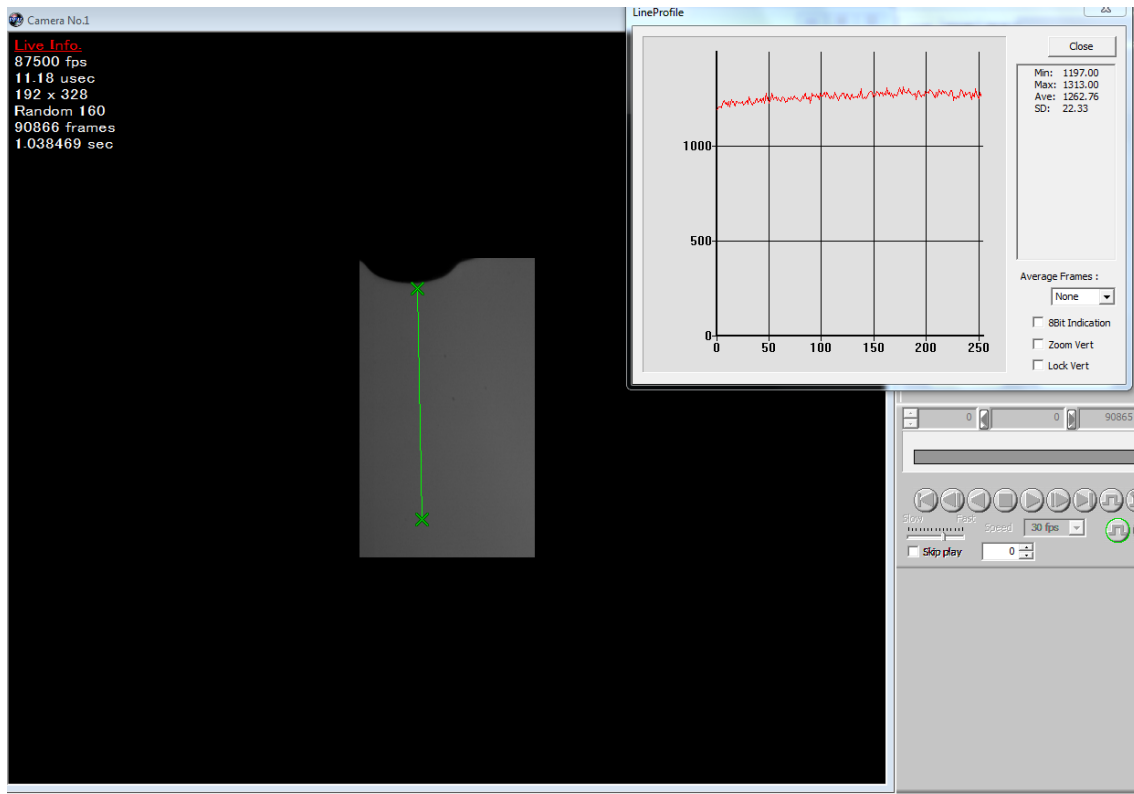
Cada punto ha sido ensayado en 10 tomas repetidas para garantizar la fiabilidad de los ensayos y la repetibilidad de los resultados

### 5.1.1. Criterios a la hora de hacer los ensayos

Para hacer los ensayos técnicamente eficientes es necesario primeramente que no haya nadie en la sala de ensayos en el momento de medición. Antes de la medición y tras el calibrado de los equipos ópticos y del pulso de luz puesto en marcha no se debe de tocar nada para que no se modifiquen los equipos. Se debe de comprobar también a

través del ordenador que este bien situada la imagen de captura de video. Se emplea el software para poderse visualizar y alterar la imagen.

Es muy importante comprobar la curva de luz, es decir, la intensidad del fondo debe de ser lo más homogéneo posible como se observa en el ejemplo de la imagen 68.



68. Ejemplo de cómo visualizar el contraste de luz de fondo. Fuente: Elaboración propia.

Para que las pruebas de ensayo sean optimas es recomendable atenuar la luz que entra del exterior bajando un poco las persianas de la sala, las luces se pueden mantener encendidas durante los experimentos. El equipo de control (ordenadores, ICU, picolo...) deben de estar en una sala contigua.

En ella se debe de vigilar que los parámetros son estables y seguros. En caso de que haya algún valor de parámetro fuera de lugar se deberá de parar automáticamente todo circuito eléctrico, hidráulico y neumático.

## 5.2. Composición del fuel: isooctano

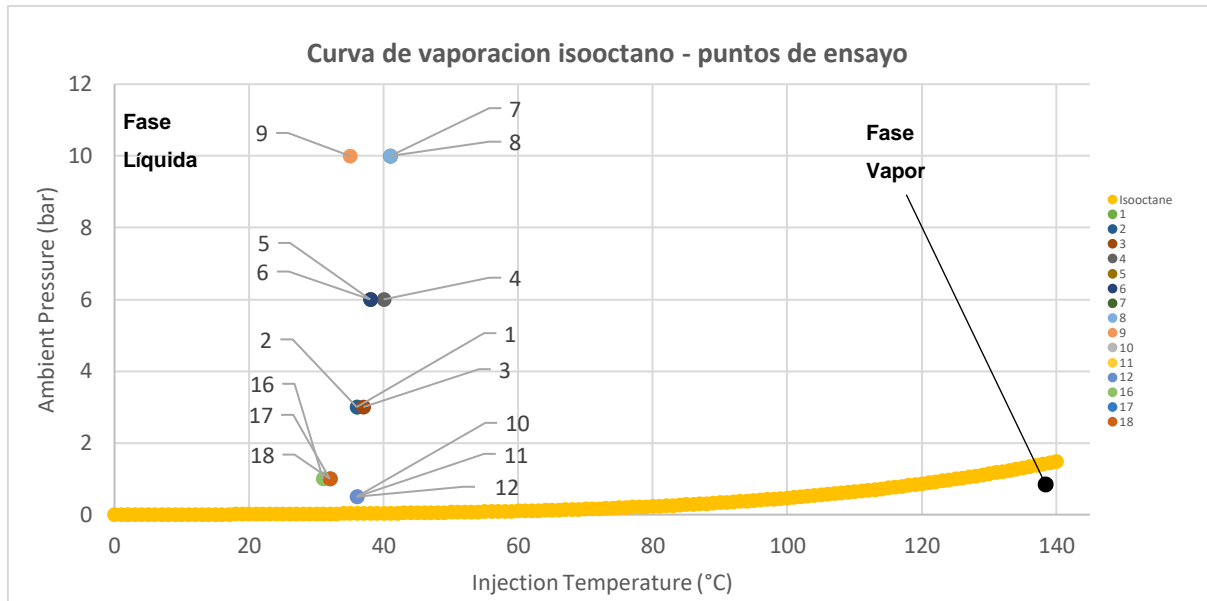
El fuel que ha sido empleado es el isoocetano [50]. Es un hidrocarburo alcano de la familia de las parafinas con tipo de cadena ramificada. También se denomina técnicamente 2,2,4-trimetilpentano.

A continuación, en la tabla 5.5.2 se detalla la composición y propiedades del isoocetano:

<b>Propiedades del isoocetano</b>	
<b>Nombre de la sustancia</b>	2,2,4-trimetilpentano
<b>Número de registro (REACH)</b>	01-2119457965-22-xxxx
<b>Fórmula molecular</b>	$C_8H_{18}$
<b>Estado físico</b>	liquido
<b>Color</b>	incoloro
<b>Olor</b>	Gasolina
<b>pH</b>	neutro
<b>Masa molar</b>	117,2 g/mol
<b>Densidad</b>	0,69 g/cm <sup>3</sup> a 15°C
<b>Densidad de vapor</b>	3,9 (aire =1)
<b>Punto de fusión/congelación</b>	-107°C
<b>Punto de ebullición</b>	99°C
<b>Punto de inflamación</b>	-12°C (vaso cerrado)
<b>Presion de vapor</b>	53nPa a 20°C
<b>Viscosidad cinematica</b>	0,7246 mm <sup>2</sup> /s
<b>Viscosidad dinámica</b>	0,5 mPa s a 20°C
<b>Tension superficial</b>	18,77 nM/m (20°C)

*5.5.2. composición y propiedades del isoocetano. Fuente: Elaboración propia.*

Ahora con los puntos de ensayo explicados y el tipo de fuel descrito se puede visualizar los puntos en la curva de vaporación. La curva de vaporación ya fue explicada en la sección 2.6.3. Cómo se puede ver en el grafico 69 todos los puntos están contenidos en el lado fase liquida.



69. curva de vaporación del isooctano con los puntos de ensayo de estudio parametrizados. Fuente: Elaboración propia.

### 5.3. Metodología de extracción de datos

La extracción de los datos se comprende después de haber realizado los ensayos experimentales y además se hace a la vez que se realiza el procesamiento de datos 4.8.1.

La extracción de datos es el análisis de las imágenes de video extraídas de las técnicas ópticas.

Se utilizó la aplicación directa con *software* matemático avanzado, para este estudio se utiliza el software Matlab®. Aunque si se quiere visualizar las imágenes se utiliza el software *Photron FASTCAM Viewer software* (PFV)®.

Matlab consiste, entre varios paquetes específicos, en poder diseñar códigos y algoritmos de control que luego al ejecutar los comandos. Estos algoritmos se escriben en llamados *Scripts*<sup>ix</sup>

A continuación, se indican los algoritmos esenciales para la extracción de datos leyendo los *Scripts* de manejo:

- **ConfigCamera:** este *Script* indica el tipo de cámara y técnica que se ha empleado. También se indica el tipo de formato de imagen. Al ejecutar se compila un archivo

<sup>ix</sup> *Script*: término anglosajón que se traduce como "guion".



de extensión “.ent (software notepad)” con los datos de configuración principal en imagen 69.

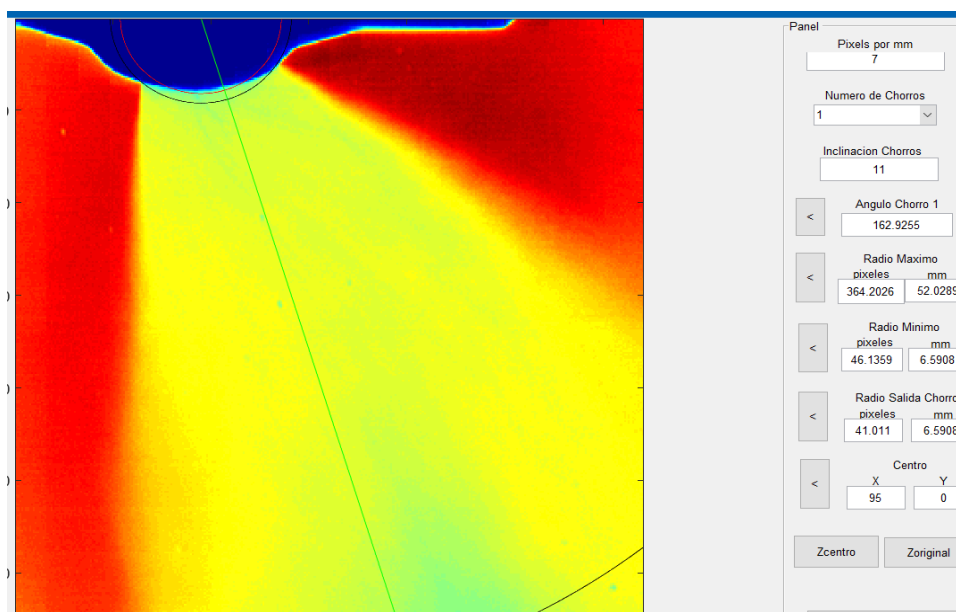
```

Camera = Photron
ImageExtension = tif
ancho = 320
alto = 328
BitDepth = 12
FrameRate = 60000
shutterspeed = 16.66666666666667
NumPerRep = 160
TotalFrame = 1600
Mode = Random 160
NRep = 10
BitCam = 12
AvimageName = AvImage.png
ConfigImageFold = \ConfigImages\
GeometryImageName = GeometryImage.png

```

70. Ejemplo de edición de ConfigCamera. Fuente: Elaboración propia,

- **CreateAverageImage:** este Script toma la media de todas las imágenes en el tiempo. Al ejecutar se crea una imagen jpg.
- **ConfigGeometry:** Este Script toma la imagen del Script anterior para poder interactuar con él. En la imagen 71 se puede observar.

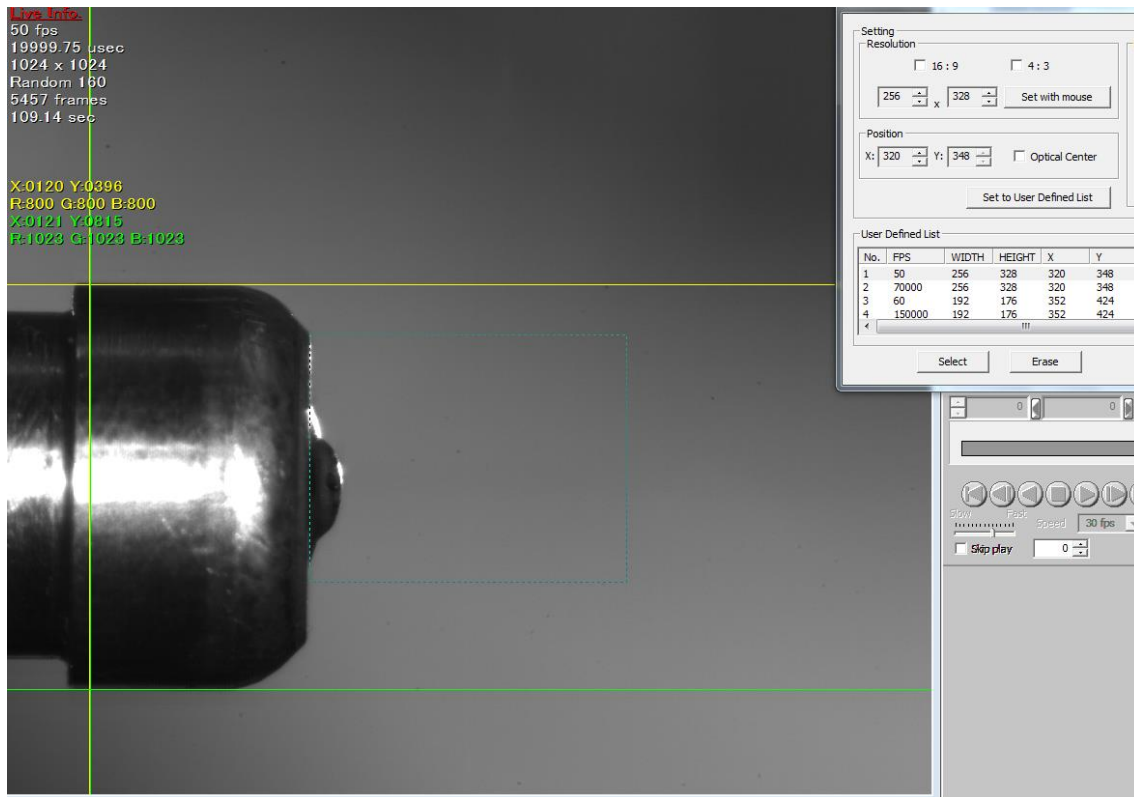


71. captura de imagen parte del procedimiento de metodología de extracción de datos. En ella se puede ver que se interactua con la imagen. Fuente: Elaboración propia.

Se describen los parámetros a manejar:

- **Pixeles por mm:** es la cantidad de pixeles que ocupan en 1 mm en imagen 72. Para averiguar este número se debe de emplear el software PFV. Se captura una imagen de la cabeza del inyector para tener como referencia y con las

herramientas de medición del programa se puede averiguar el número de ppxpmm.



72. Ejemplo de cálculo del número de píxeles por milímetro. Fuente: Elaboración propia.

- **Angulo de Chorro:** se mide desde la vertical o eje axial del inyector.
- **Radio Máximo:** Es el radio desde la cabeza del inyector hasta el umbral de captación de spray.
- **Radio Mínimo:** describe el radio mínimo donde se empieza a ver el chorro de salida.
- **Radio Salida Chorro:** es el radio por el que se empieza a grabar y tomar datos.

Entre estos dos radios existe una diferencia de espacio que se corresponde al espacio de transición del chorro hasta que se uniformiza.

- **Centro:** es el punto de origen de los radios.

Este Script debe de hacerse bien y ser eficiente con los parámetros porque condiciona el resto de Scripts.

- **ProcessingConfiguration:**

- ImageProcessing:** Este Script es importante. En él se procesan las imágenes. En este Script mientras procesa, se ejecuta los procesamientos de la sección 4.8. se puede editar el rango de imágenes, los ángulos de chorro, anchos respecto del eje axial en imagen 72. La finalidad es limitar el procesamiento dinámico del chorro. Entonces de toda la imagen de captura el programa recorta el contorno del spray y separa el spray del fondo, de esta manera se consigue la información requerida como se ve en la imagen 74.

```

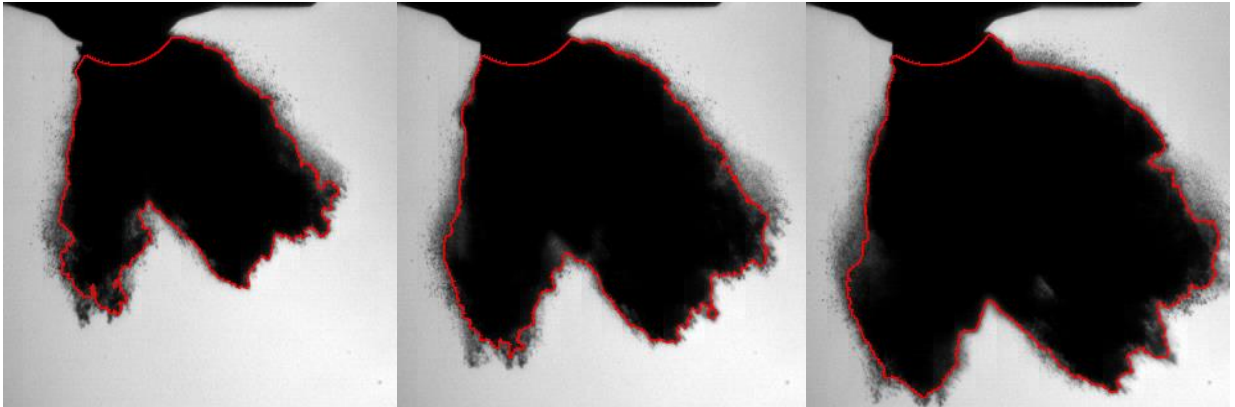
%General Input
ProcessingMethod = 'BackLit' %'Mie' = I - Ib; 'BackLit'= Ibg - I; 'Extinction' = -log(I./Ibg);
'ShadowgraphyCMT' ; 'Shadowgraphy'; 'ShadowgraphySNL'; 'ID_LOL'; Shadowgraphy2 (dynamic bg)
Rep2Process = 0 % Test Repetitions to be processed (0: all repetitions)
ImgNums = 0 % Range of images read for the processing. Put 0 to read all
of the images.
NameFold = 'variable' % Name of the folder where the contours images are saved
ContourSaving = 'on' % Save the contour information to the output file data07.mat

% Mask Settings (only for single orifice)
AngleMask = 100 %Default angle for single orifice
-----line 12-----
-----line 25 - 28-----
% Angle and Width calculations
angle_int= [0.05 0.30 0.12 0.5 0.12 0.6] % Percentage of the spray tip penetration fitted for the
angle calculation (3 sectors defined in pairs)
widthatradius = [5 10 15 20 30 40] % [mm] Radial distances from the tip at which you want to
measure spray contour widths, note that it goes in mm and not as percentages. You can set from 1
to as many different distances as you want.
FixScalingLength = 30 % [mm] Radial distance from the tip to which the fixed
angle will be scaled

----- line 42 - 49 -----
% MIE/DBI/Extinction/ID_LOL
MDE.ThresholdMethod = 'fixed' % 'LRT'= calculation of the an adjustable threshold /
'fixed' = aplicacion of a fixed threshold / 'OTM' = Otsu Method %'wpm'= calculation
the threshold based on wavelet packet analysis of histogram
MDE.BgRange = 2:8 % Range of images used for the background (referred to
movie index)
MDE.fixed_ths = 0.6 % From 0 to 1. Indicates the threshold as % of the dynamic
range of the background corrected image. NOTE that if ProcessingMethod is 'extinction'
this will be an absolute extinction value
MDE.minths = 0.05 % Minimum absolute ths. If there is no spray the threshold
calculated with 'fixed_ths' can be very low, this protects the software before the start
of injection
MDE.minBgint = 300 % Background intensities below this number (in the cameras
bit range (i.e. 0 - 4095 for 12 bit cameras) are turned to NaN in the EXTINCTION method
calculations
MDE.Bgcorr = 0 % Background correction, HS cameras can provide counts
where it should read zero due to ghosting effects and poor automatic calibration. This
is to correct the extinction calculation (-log(I-bg)/(I0-bg))

```

73. Ejemplo de edición de ImageProcessing. Elaboración propia.



74. Ejemplo de demostración de captación del contorno del spray. Tiempo de ejecución: 33  $\mu$ s.  $P_{back}$ :10 bar;  $P_{inj}$ : 200bar. Fuente: Elaboración propia.

- **Organizevisudata:** organiza los datos extraídos anteriores y los transforma en datos fácil de manejar
- **Todocopiaryanadirdatos:** se ejecuta fuera de la carpeta donde están los videos para reestructurar en cada carpeta los datos de cada punto de prueba.
- **CreateTestPlanandDLinputs:** ejecuta la unión entre todos los datos y los que se requiere, que estan organizados en un Excel para que sean rellenados.
- **GatherandStampData:** Este Script recoge los datos anteriores y los clasifica en carpetas
- **RollingPolynomialAveraging:** Se calcula el promedio polinómico rodante spraywise, aunque también se calculan los resultados finales.
- **calculateSOI:** el SOI es el tiempo que tarda, o retraso, el visor óptico en detectar la imagen del empuje de la inyección. Es un tiempo importante y a tener en cuenta ya que cada ensayo tiene un retraso distinto. Se debe de conocer el tiempo de retraso para igualas todos los datos y gráficas en un mismo origen. Entonces, se resta el retraso del tiempo de inyección de cada ensayo como se ve en ecuación (12).

$$\text{Tiempo después del SOI} = \text{Tiempo de inyección} - \text{tiempo SOI}$$

(12)

Con estos algoritmos aplicados consecuentemente se han extraído los datos y ordenados en parámetros. Ahora se pasaría a evaluar y graficar para obtener unas conclusiones fiables.

## 5.4. Penetración del Spray

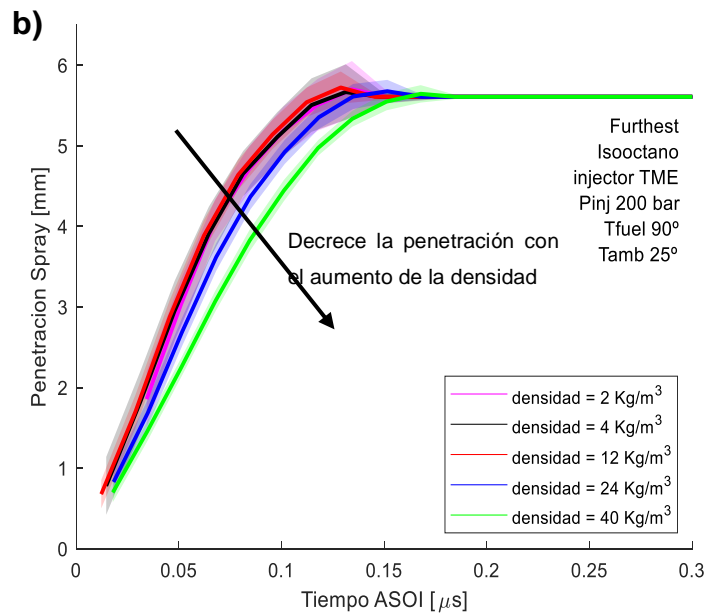
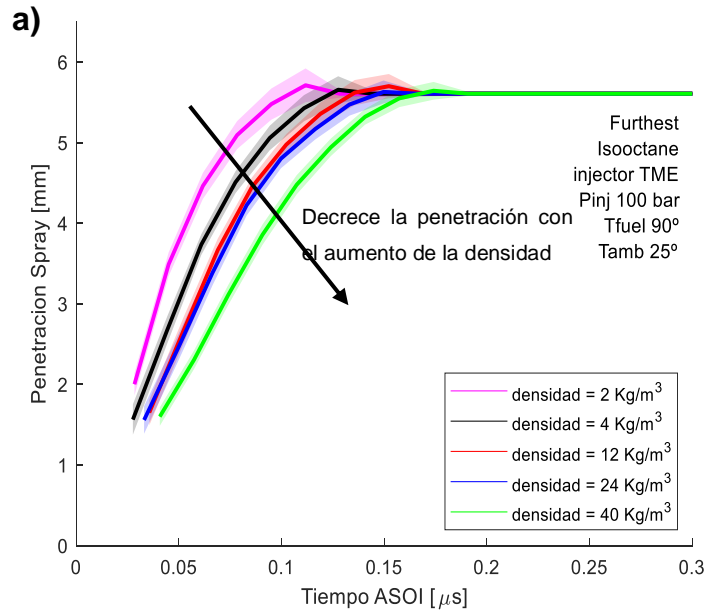
La penetración mide la distancia que se proyecta el chorro desde el radio de salida de la cabeza del inyector hasta el umbral o radio máximo. El algoritmo recoge la distancia de penetración en la cámara por fracción de tiempo respecto del eje axial. Por tanto, para esta sección las gráficas tendrán en el eje X tiempo después del SOI y en el eje Y penetración.

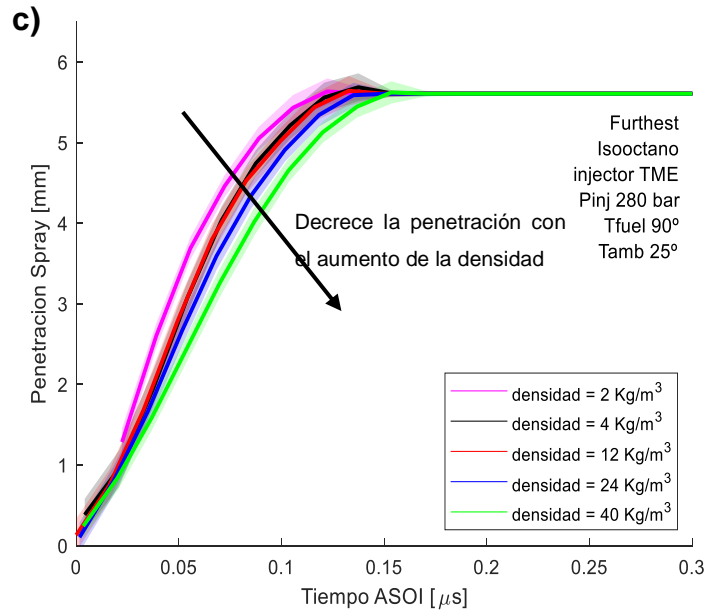
Para una comprensión más clara y visible se van a dividir las gráficas en función de:

- Densidad de la cámara
- Presión de cámara
- Presión de inyección

### 5.4.1. Efecto de la densidad

En la figura 75 se representan las diferentes condiciones de densidad con las que se ha experimentado en los ensayos con respecto al tiempo ASOI. Se evalúa las penetraciones en las diferentes condiciones ambientales de la cámara. En cada una de las gráficas se mantiene la presión de inyección constante en los valores: 100 bar, 200 bar, 280 bar; Temperatura Fuel 90° (363 K); Temperatura de la cámara se sitúa en 25°C (298 K).





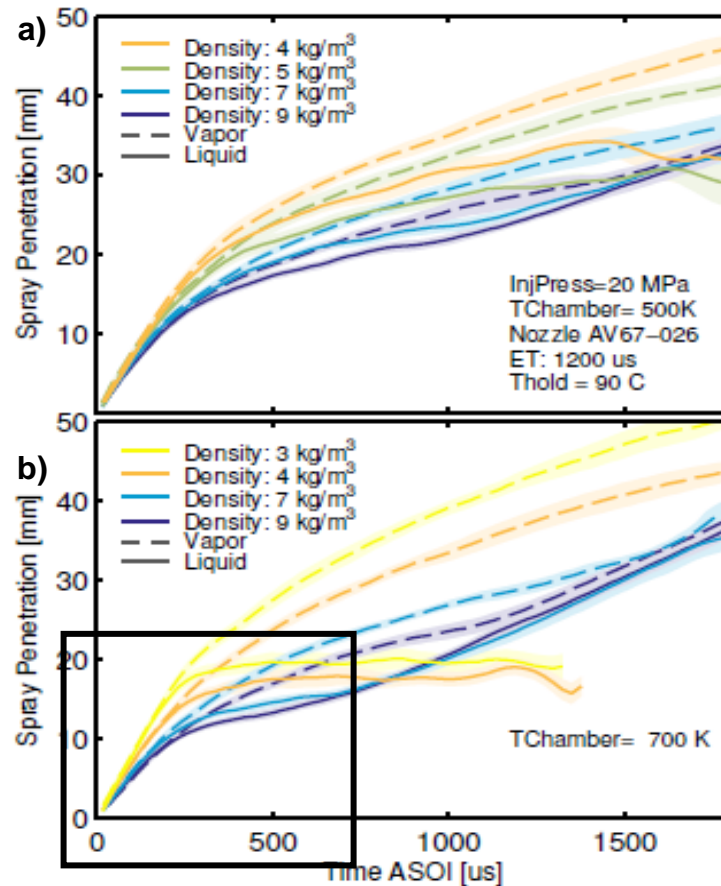
75. Gráfica de penetración: Variación de la densidad en diferentes presiones de inyección en función del tiempo. Arriba (a) presión de inyección a 100bar; medio (b) presión de inyección a 200 bar; abajo (c) presión de inyección a 280 bar. Temperatura FUEL a 90°C (363 K). Temperatura ambiente a 25°C (298 K). Fuente: Elaboración propia.

Tras el análisis de las gráficas se argumenta que a medida que aumenta la presión de inyección las penetraciones convergen en una misma línea por el motivo del umbral óptico y de que estamos en campo cercano. Esto quiere decir, para una presión de inyección de 280 bar los tiempos de penetración son cuasi idénticos para las diferentes condiciones, mientras que para una presión de inyección de 100 bar cada condición es distinta, tardando menos en expandirse o alcanzar la distancia máxima de umbral (se considera la distancia de umbral como referencia limite que, con presión de inyección de 280 bar, este hecho no es lógico, ya que el momento es mayor a 280 bar que a 100 bar).

Por otro lado, se observa que en todo momento tarda antes en alcanzar el máximo la condición ambiente de densidad 2 Kg/m<sup>3</sup>. Este hecho resulta particularmente curioso en la gráfica a) donde penetra mucho más rápido y tarda menos en expandirse que respecto a la condición de densidad 40 Kg/m<sup>3</sup>. Hay que decir que la condición ambiente de la cámara de densidad 2 Kg/m<sup>3</sup> se corresponde con una presión subatmosférica, lo que este hecho comprueba el efecto de succión se forma y agiliza la atomización en la cámara.

En las gráficas 75 se observa que durante un pico de tiempo se sobrepasa el límite óptico. Este fallo es cometido al movimiento de la cámara en el momento en el que se estaba realizando el ensayo experimental de ese punto.

Para corroborar lo visto hasta ahora, en la tesis de trabajo “Study on Advanced Spray-guided Gasoline Direct Injection Systems” de Daniel Vaquerizo, UPV, 2017 [1] se comenta lo siguiente al respecto de inyectar en condiciones de alta densidad:



76. Gráfica de penetración: Variación de la densidad en diferentes presiones de inyección en función del tiempo. Arriba (a) Temperatura ambiente 500 K; abajo (b) Temperatura ambiente de 700 K. Fuente: Elaboración propia.

“En la variación de densidad a 700 K, la temperatura es suficiente para hacer posible la estabilización de la penetración de líquido dentro del intervalo de tiempo capturado. Sin embargo, la penetración de líquido para las condiciones de mayor densidad (más de 4 kg / m<sup>3</sup>) no se estabiliza, sino que sigue aumentando e incluso superando la penetración de líquido de las condiciones de menor densidad. El fenómeno que tiene lugar aquí es bastante diferente de lo que se informó anteriormente en la investigación de Diesel y está relacionado con el colapso de los diferentes espráis. El fenómeno que tiene lugar aquí es bastante diferente de lo que se informó anteriormente en la investigación de Diesel y está relacionado con el colapso de las plumas de atomización” [1].

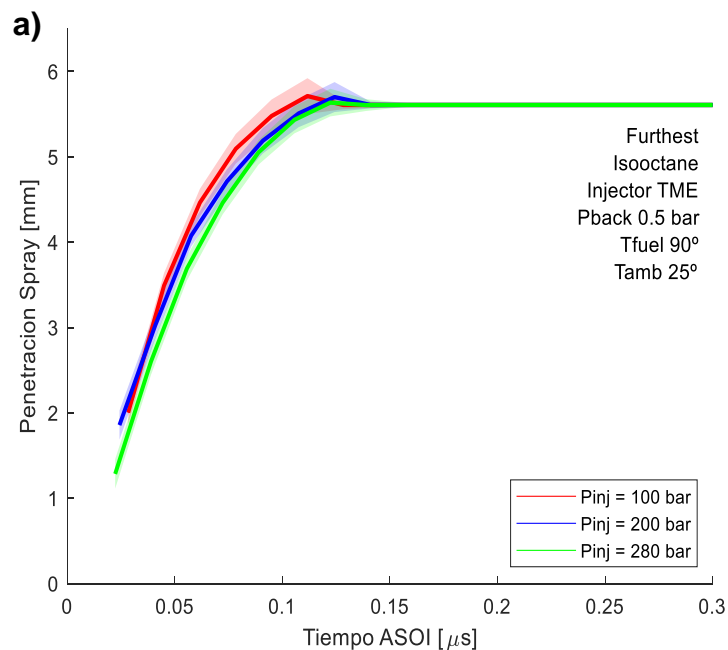
En este punto del apartado, este estudio no ha trabajado en el campo lejano como si en el anterior trabajo lo que no se puede demostrar que continua la penetración a altas

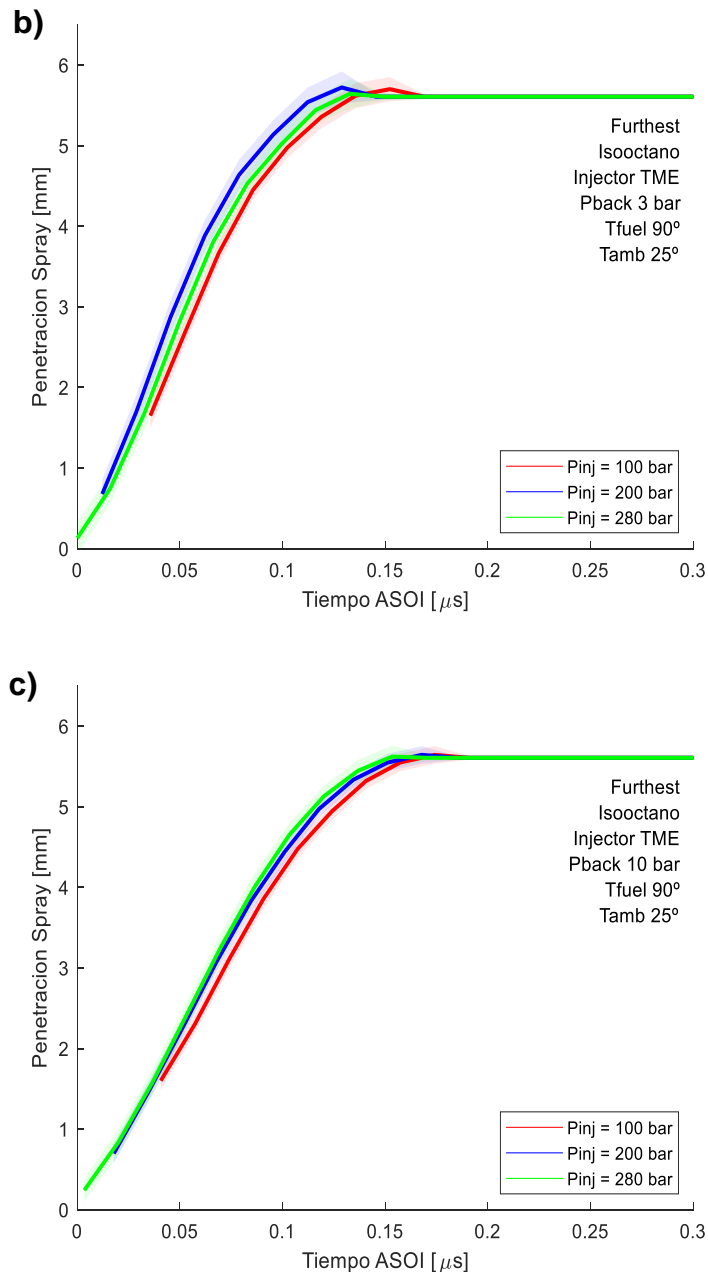


densidades, pero si se ha estudiado en el campo cercano. Como se observa en el recuadro negro que se ha hecho en la imagen 76 a altas densidades tarda más en penetrar como se observa también en la imagen 75 posiblemente debido al efecto que han denominado varios autores como colapso de Spray. Para poder aclarar esto se continúa evaluando información de los datos extraídos.

#### 5.4.2. Efecto de la presión de inyección

En la graficas 77 se evalúa la penetración en el tiempo ASOI manteniendo constante ahora la presión ambiente de la cámara y variando la presión de inyección. Las presiones ambientes de estudio son de 3 bar, 10 y 0.5 bar. Las presiones de inyección oscilan en 100 bar, 200 bar, 280 bar. La temperatura del fuel se mantiene en todo momento en 90°C (363 K).





77. Grafica de penetración: Variación de la presión de inyección en diferentes presiones ambiente en función del tiempo. Arriba (a) presión de ambiente a 0,5 bar; medio (b) presión de ambiente a 3 bar; abajo (c) presión de ambiente a 10 bar. Temperatura fuel a 90°C. Temperatura ambiente 25°. Fuente: Elaboración propia.

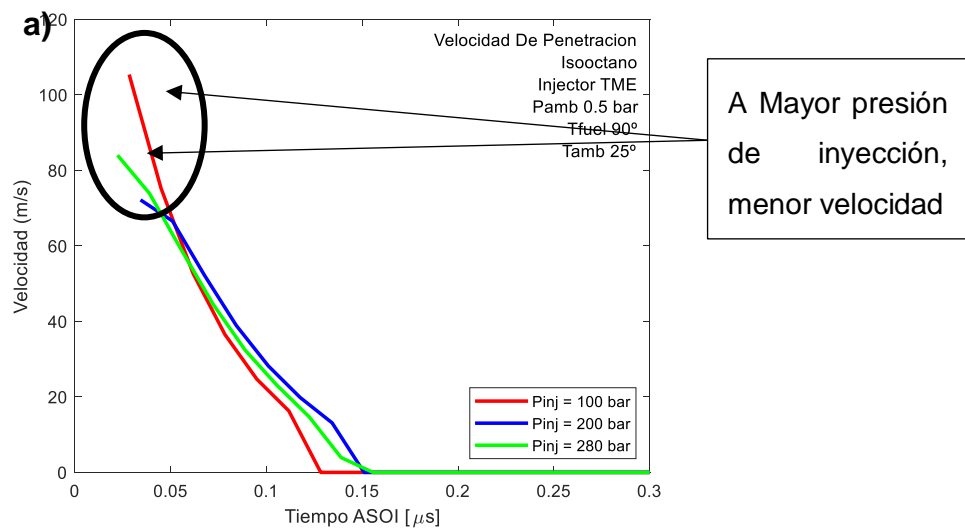
En general las tres graficas de arriba tienen la misma tendencia. Sin embargo, a medida que se aumenta la presión ambiente de la cámara las penetraciones tardan más en alcanzar la distancia máxima de umbral (se considera la distancia de umbral como referencia limite). Esta condición se puede aprobar si se considera que al haber más presión en la cámara el flujo tarda más en penetrar ya que se tiene que enfrentar con una mayor resistencia del aire

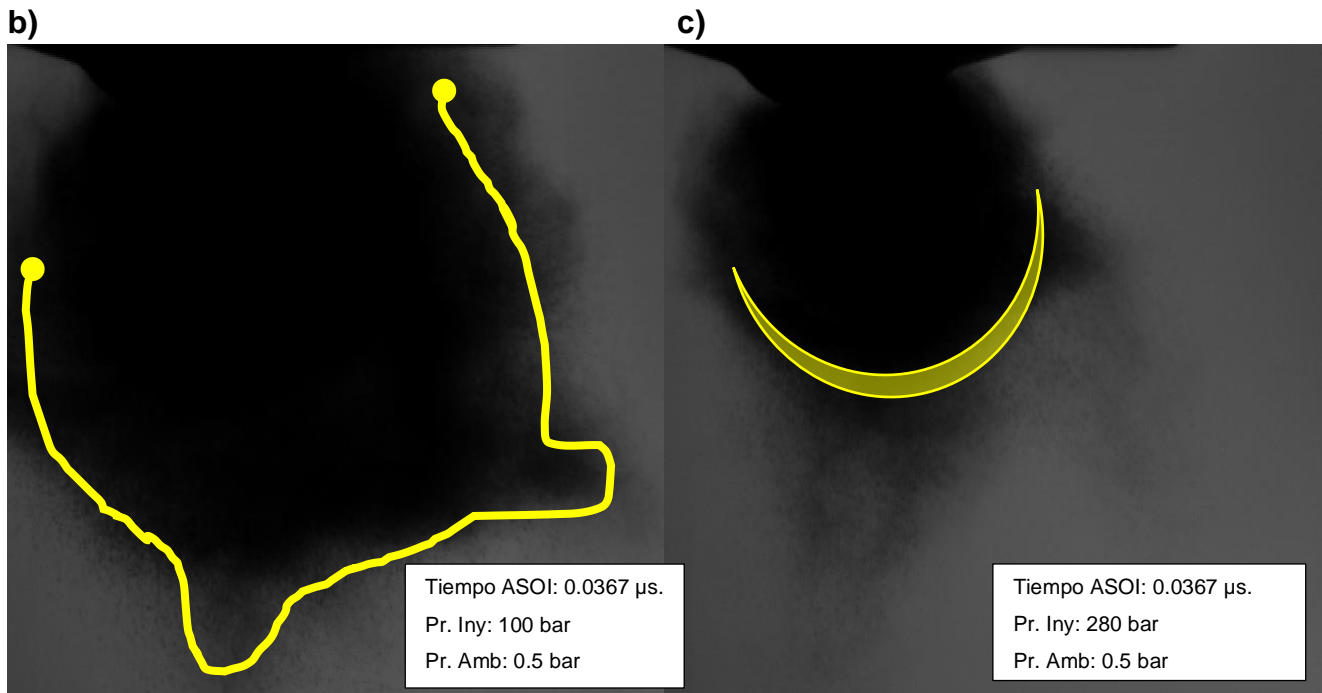
En particular, se observa para una presión de inyección 100 bar también tarda más en expandirse el fluido que si la presión sube a 280 bar.

En la gráfica a) de la imagen 77 es de especial interés porque la presión ambiente es subatmosférica. En ella se puede observar varios fenómenos físicos.

- Principalmente se observa como a medida que disminuye la presión ambiente la penetración del chorro aumenta
- Se observa también que las máximas penetraciones se logran antes, debido a la menor presión ambiente respecto a las otras gráficas.
- Ante una presión inyección de 280 bar, el tiempo de penetración es mayor que si se compara con una presión de inyección de 100 bar, cuando se supone que a más presión de inyección antes alcanzará el umbral.

El que se produzca de esta manera y no de la otra tiene que ver con la velocidad a la que sale el chorro en el ensayo de 280 bar. Como se puede apreciar en la gráfica a) de la imagen 78, ya que el fluido sale tan deprisa que no le da tiempo a acostumbrarse al ambiente que lo rodea hasta el punto que se frena formando una onda de compresión haciendo disminuir la velocidad. A continuación, en imagen 78, se incluye la gráfica de velocidad frente al tiempo ASOI con las mismas condiciones que estamos hablando.





78. Arriba (a): Variación de la velocidad a diferentes presiones de inyección [100 bar, 200 bar y 280 bar] en función del tiempo. Presión ambiente de 0.5 bar, temperatura fuel 90°C (363 K). Visualización del inicio de dos inyecciones a 0.35  $\mu$ s y presión ambiente 0.5 bar. Izquierda (b): presión inyección 100 bar, Derecha (c): presión inyección 280 bar. En amarillo se muestra la diferencia de salidas de chorro donde a la derecha se puede apreciar una onda de compresión que se propaga en el resto. Fuente: Elaboración propia.

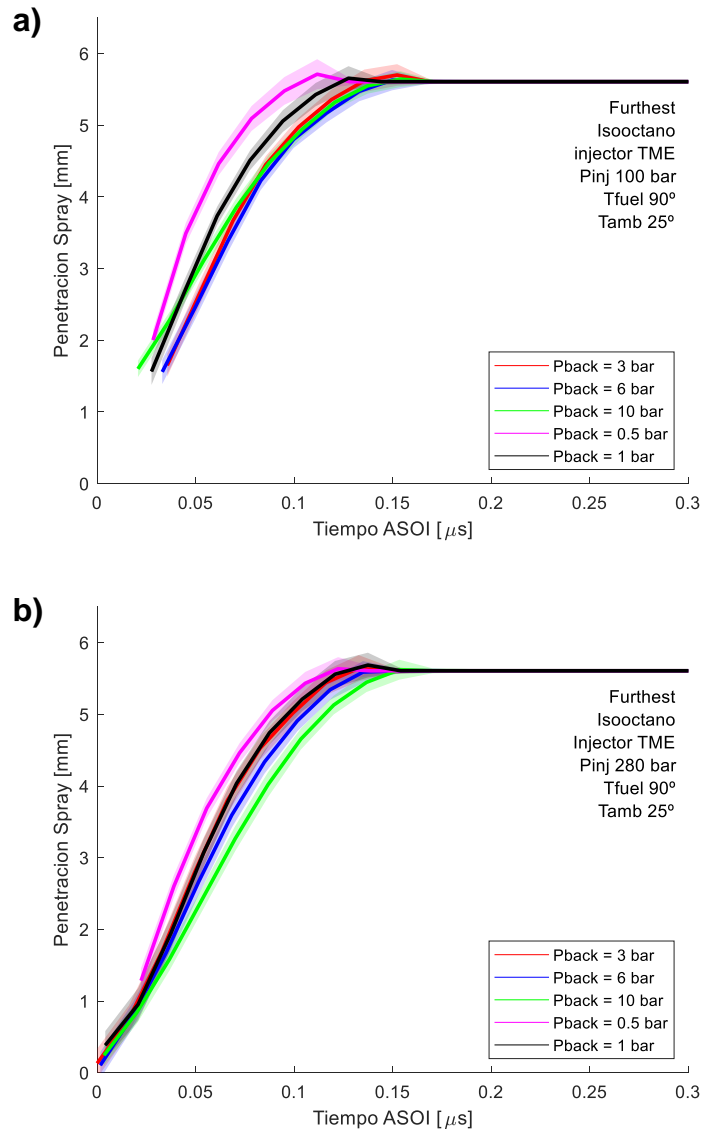
Se observa también en las imagen 78 b) y c) para un mismo tiempo ASOI una diferencia clara de desarrollo de spray, es decir, ante una presión de inyección de 100 bar, el tiempo de penetración es menor si se compara con una presión de inyección de 280 bar como se ve en la gráfica de la imagen 77 a).

Respecto a la imagen 78 b) se confirma que se produce un efecto de succión o búsqueda de equilibrio de presiones por la rápida expansión como se puede observar. En la imagen 78 c) se observa que el chorro de salida se ha transformado de tener varios chorros, el inyector el multiorificio, a ser uno, el frente de spray es muy similar a una onda de compresión. Este hecho visual más los hechos gráficos indica que al salir el fuel a mayor velocidad no se adapta al cambio de presión, concentrándose el fuel y comprimiéndose apareciendo más resistencia, ya que las gotas no se rompen. Por tanto, el frente colapsa, se frena y se forma la onda de compresión.

### 5.4.3. Efecto de la presión ambiente

A continuación, se representa en las gráficas 79 penetración frente al tiempo ASOI en función de la presión de la cámara y manteniendo las presiones de inyección constante. Las presiones ambientes son de 0.5 bar, 1 bar, 3 bar, 6 bar, 10 bar. Las presiones de

inyección varían de 100 bar, 200 bar, 280 bar. La temperatura fuel se ha mantenido constante en 90°C (363 K).



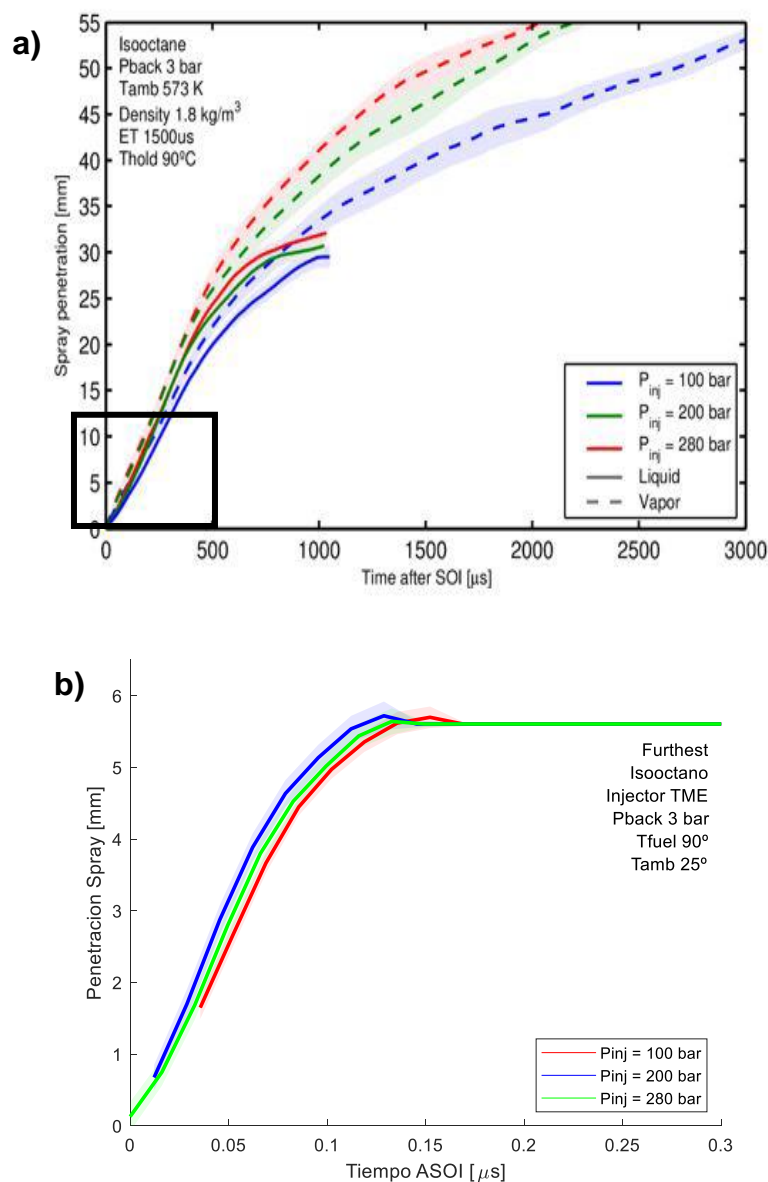
79. Grafica de penetración: Variación de la presión ambiente en diferentes presiones de inyección en función del tiempo. Arriba (a) presión de inyección a 100bar; abajo (c) presión de inyección a 280 bar. Temperatura fuel a 90°C. Temperatura ambiente a 25°C. Fuente: Elaboración propia.

Se demuestra que el aumento de la presión de inyección no favorece una penetración. Con una presión ambiente baja si favorece la penetración posiblemente debido al efecto de succión o búsqueda de equilibrios de presiones.

#### 5.4.4. Comparativa con otros autores

Para constatar que los datos son correctos y validos se debe de comparar con otros estudios y trabajos. En este apartado se va a centrar en comparar las gráficas de la sección 5.4 con dos trabajos de igual similitud al que se está investigando en este trabajo. Se trata del trabajo realizado por el estudiante universitario Daniele Arduino de la Universidad Politécnica de Valencia “*experimental study of gasoline direct injection under spray collapse conditions*” año 2019 [74]. Otro trabajo de validación es el artículo de investigación de la autora Li Yanfei de la universidad de Pekín “*Morphology analysis on multi-jet flash-boiling sprays under wide ambient pressures*” año 2018 [75].

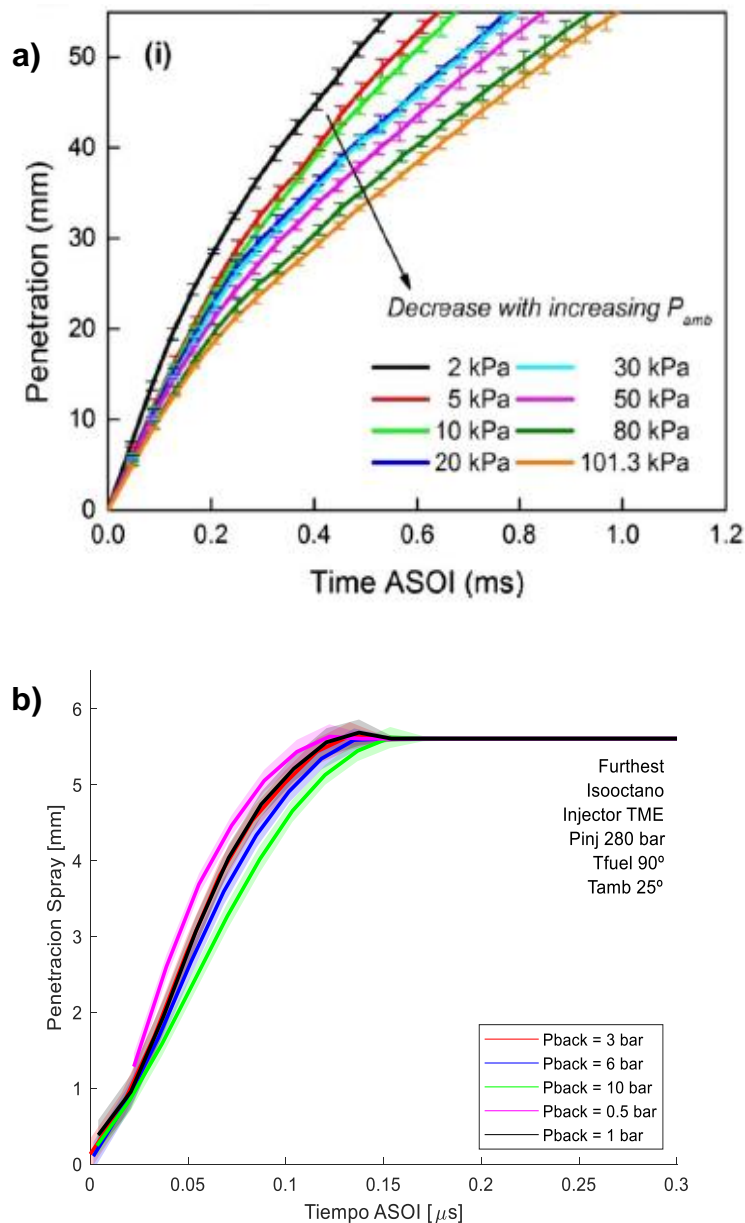
Respecto al primer trabajo se compara entre si los parámetros de presión de inyección de 100bar, 200 bar y 280 bar y de presión de ambiente de 3 bar.



80. Evaluación de graficas de penetración: comparación de presiones de inyección [100 bar, 200 bar, 280 bar] a presión ambiente de 3 bar en función del tiempo. Arriba (a) Temperatura ambiente 573 K. Grafica de

Daniele Arduino, UPV, 2019. Abajo (b) Temperatura ambiente 298 K. Grafica de Alejandro ortega arribas, UPV, 2020. Fuente: Elaboración propia.

Se puede ver en la imagen 80 que las tendencias son claramente muy idénticas entre las dos graficas anteriores. Si se observa en el recuadro de la gráfica a) la presión de inyección a 100 bar (azul) está por debajo de los otros dos puntos de ensayo igual que en la gráfica (b). lo mismo ocurre con los otros dos puntos que empiezan con la misma tendencia.



81. Evaluación de graficas de penetración: comparación de presiones ambiente [0.5 bar, 1 bar, 3 bar, 6 bar, 10 bar] a presión de inyección de 3 bar en función del tiempo. Arriba (a) Temperatura ambiente 293 K. Grafica de Yanfei Li, Pekín, 2018. Abajo (b) Temperatura ambiente 298 K. Grafica de Alejandro ortega arribas, UPV, 2020. Fuente: Elaboración propia.

Se puede ver en la imagen 81 las mismas tendencias entre las dos gráficas, a medida que aumenta la presión ambiente la penetración decrece y tarda más en desarrollarse.

## **5.5. Angulo de Spray**

La medición y evaluación del ángulo de spray influye en el comportamiento del chorro, es decir, explica cómo se expande o se estrecha el chorro en el espacio de la cámara y se atomiza más rápido la mezcla.

Para una comprensión más clara y visible se van a dividir las gráficas en función de:

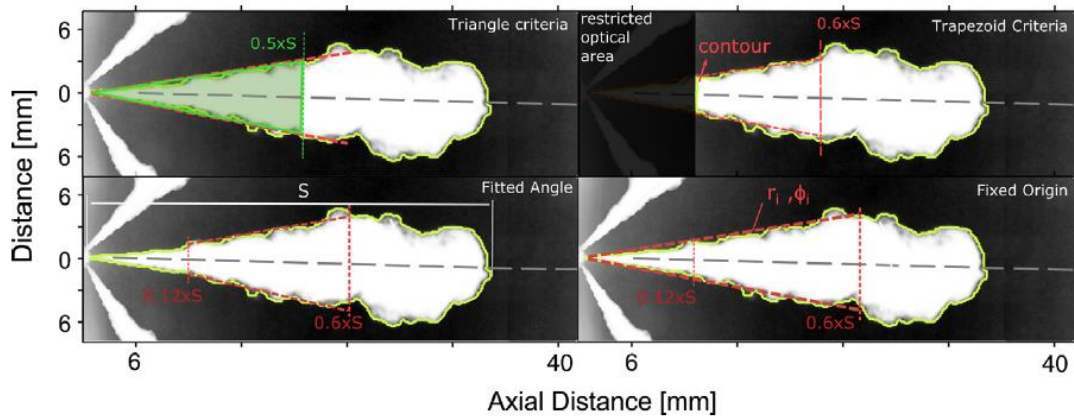
- Densidad de la cámara
- Presión de cámara
- Presión de inyección

Antes, una vez detectado el contorno de cada uno de los puntos de ensayo los algoritmos detectan y miden los ángulos que se va produciendo en el tiempo. Hay que indicar que no hay un método exacto que se pueda aplicar ya que cada investigación, en general, tiene diferentes condiciones y factores que alteran al chorro, por tanto, no se puede verificar con un método, hay que ver cual resulta ser el mejor.

### **5.5.1. Evaluación del método de ángulos**

Existen cuatro tipos de algoritmos de ángulos como se puede apreciar en la imagen 82. Los diferentes métodos encontrados en la literatura pueden producir diferencias sustanciales en el ángulo de dispersión de atomización, por lo tanto, es importante justificar la elección de uno sobre los demás. Se han considerado las cuatro definiciones debido a su uso generalizado por la comunidad científica [76]:





82. Método de ángulos. Fuente: [76].

**1. Método triangular.** La definición se basa en el ángulo de un triángulo isósceles. El triángulo isósceles se construye considerando la altura como la mitad de la penetración de rociado ( $0: 5S$ ) y un área equivalente a la región de rociado desde la salida de la boquilla hasta la mitad de la penetración. Esta definición de ángulo fue descrita por Naber y Siebers [76]. Este método no es lo bastante robusto para acercarse al verdadero ángulo además de ser limitado en el cálculo

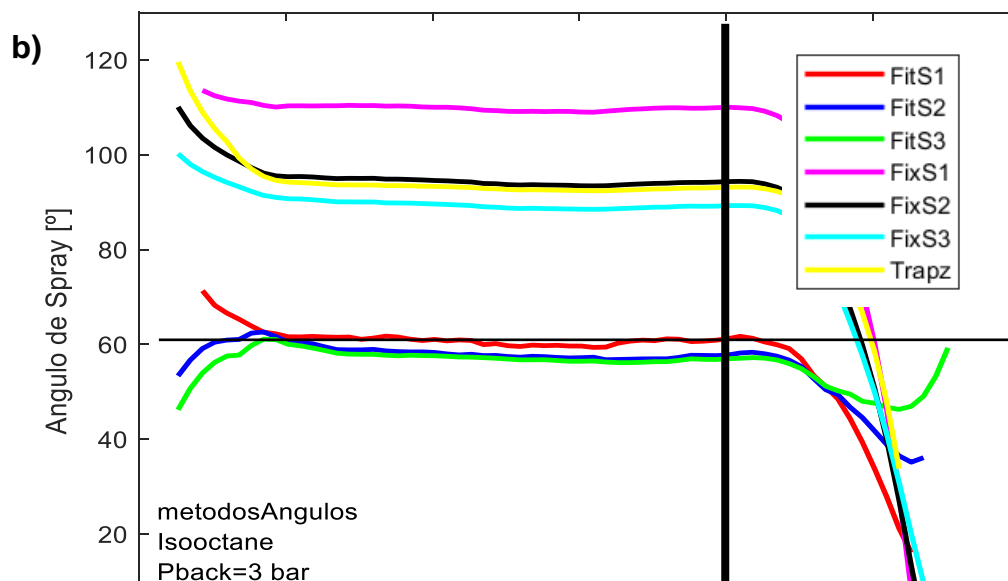
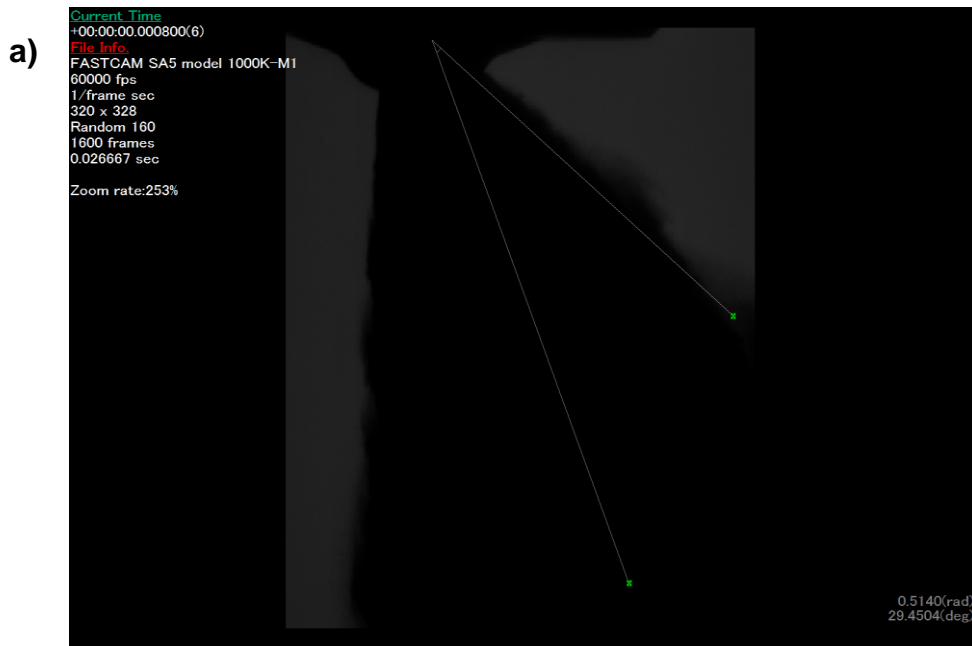
**2. Método trapezoidal (Trapz angle).** Este caso es similar al criterio de triángulo definido por Naber & Siebers, adaptado para casos en los que el contorno del aerosol no está disponible cerca de la boquilla (por ejemplo, en pruebas Schlieren de doble paso). Aquí el ángulo es el de un trapecio isósceles con la misma área que el aerosol. La base del trapecio coincide con el contorno del rociado más cercano a la boquilla. El método trapezoidal requiere que las dos líneas que forman el ángulo se crucen en el origen geométrico de la atomización (orificio de salida) [76].

**3. Método de ángulo ajustado entre intervalos (Fitted angle).** En este caso, se ajustan dos líneas al contorno del rociado, comenzando con el 12% de la penetración y terminando con el 60%. Es posible que las líneas no se crucen en el orificio de la boquilla, esto significa que no se tiene en cuenta el origen de la atomización [76].

**4. Método de Origen fijo (Fixed angle).** El origen es fijo y luego se ajustan dos líneas usando un promedio ponderado de cada punto en el contorno definido en coordenadas polares [76].

Con las definiciones de cada método de evaluación de ángulos se estudia cual es que más se adapta a este trabajo. Los tres últimos métodos son más robustos que el primero, por tanto, se estudia con esos tres. Entonces se procede a la evaluación del método de ángulos.

Para saber que método es el idóneo y se ajusta a la realidad se debe de captar primero una instantánea de tiempo de los ensayos experimentales que se han realizado y se mide el ángulo medio, es decir, desde el eje axial hasta el final del ancho del chorro. Por otra parte, se obtiene los datos de distintos métodos de ángulos del ensayo experimental de donde se ha obtenido la instantánea y la medición del ángulo y se grafican.



83. Método de evaluación de ángulo. arriba (a) instantánea de ensayo a presión ambiente de 3 bar y presión de inyección de 280 bar, tercera repetición del ensayo, tomada  $0.8 \mu\text{s}$  después del inicio. Abajo (b) diferentes métodos de captación de ángulos de ese punto de ensayo. Se señala mediante dos barras el momento de la instantánea y el modelo que se acerca al verdadero ángulo. Fuente: Elaboración propia.

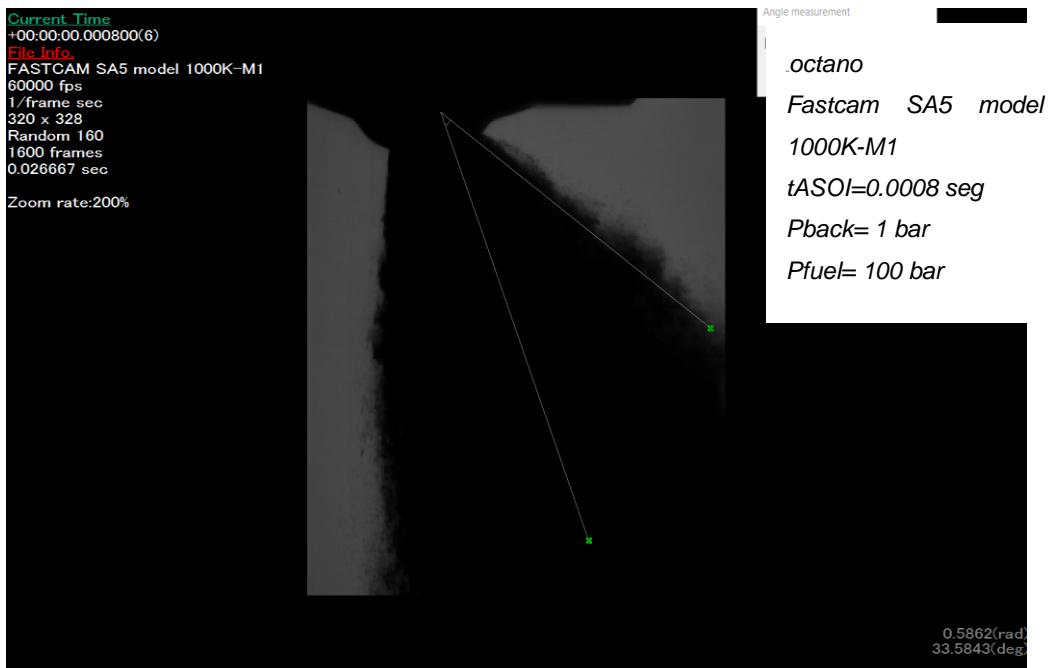
En la imagen 82 se tiene una instantánea arbitraria, ensayo a presión ambiente a 3 bar y presión de inyección a 280 bar, 3<sup>o</sup> repetición de ensayo. El semiángulo que se forma desde el eje axial hasta el contorno del chorro es de 29,45° lo que equivale a un ángulo de salida de 59°. En la imagen 82 abajo se tiene los diferentes métodos de ángulos.

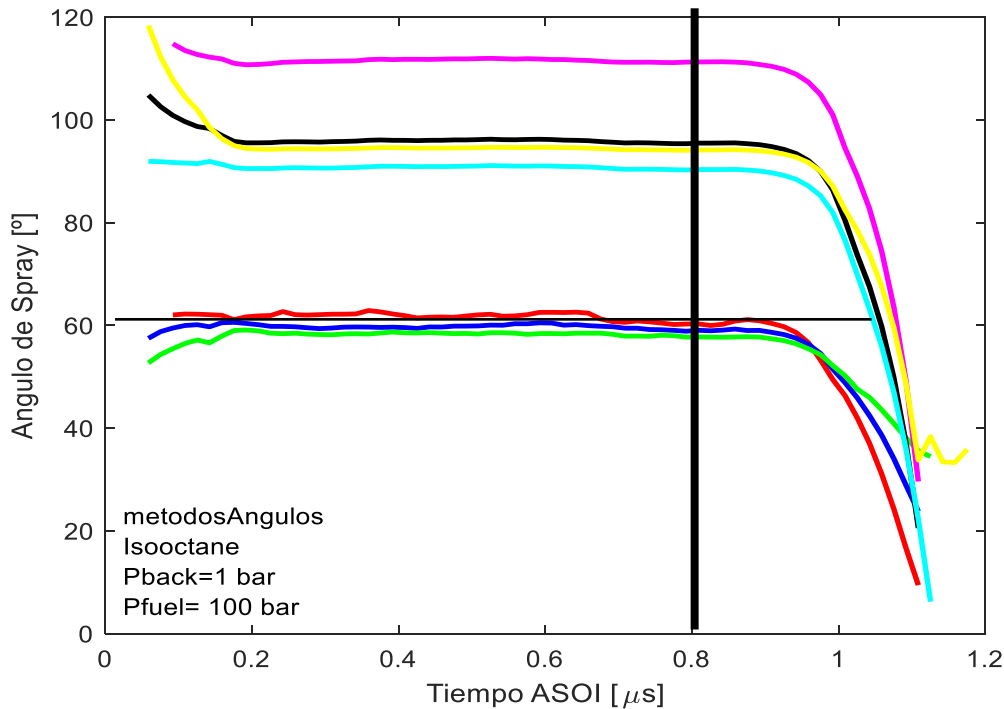
A continuación, se indica que es cada método:

- *FitS1 – FitS2 – FitS3*: method Fitted Angle
- *FixS1 – FixS2 – FixS3*: method Fixed Angle.
- *Trapz*: Trapz Angle

De los siete tipos es el que más se acerca al ángulo verdadero es el FitS1.

Para confirmar que ese el método a usar para este trabajo se vuelve a proceder a realizar la misma investigación con otra instantánea como se puede ver en la imagen 84.





84. Método de evaluación de ángulo. arriba (a) instantánea de ensayo a presión ambiente de 1 bar y presión de inyección de 100 bar, tercera repetición del ensayo, tomada 0.8  $\mu$ s después del inicio. Abajo (b) diferentes métodos de captación de ángulos de ese punto de ensayo. Se señala mediante dos barras el momento de la instantánea y el modelo que se acerca al verdadero ángulo. Fuente: Elaboración propia.

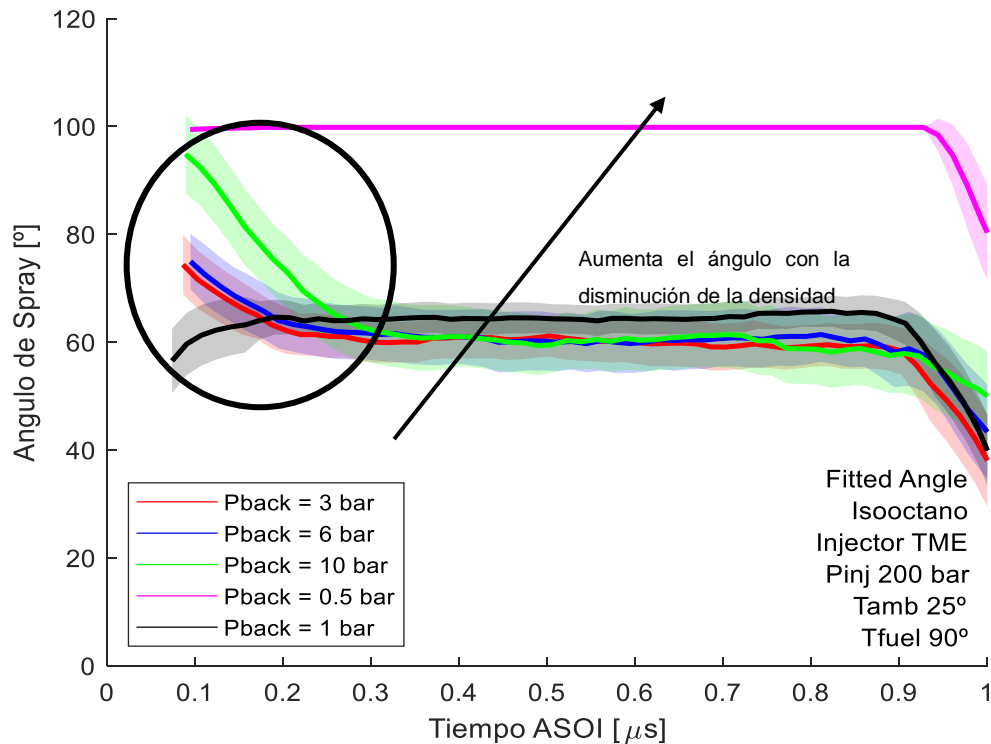
Se confirma con la imagen 84 que el método que más se adecua a este trabajo es el FitS1 porque en la imagen de arriba (a) el semiángulo es de  $33,5^\circ$  lo que es equivalente a  $67^\circ$  de ángulo de chorro siendo el método FitS1 el que mide bien el ángulo.

Con el método *FittedS1 Angle* (FitS1) demostrado como método de evaluación de ángulos para este trabajo se evalúan los ángulos del resto de puntos en las demás condiciones.

### 5.5.2. Efecto de la densidad en la atomización

El efecto de la densidad caracteriza a la mezcla y afecta principalmente en atomización para la posterior combustión. El inyector debe ser capaz de suministrar la cantidad adecuada de combustible en todas estas condiciones posibles [1].

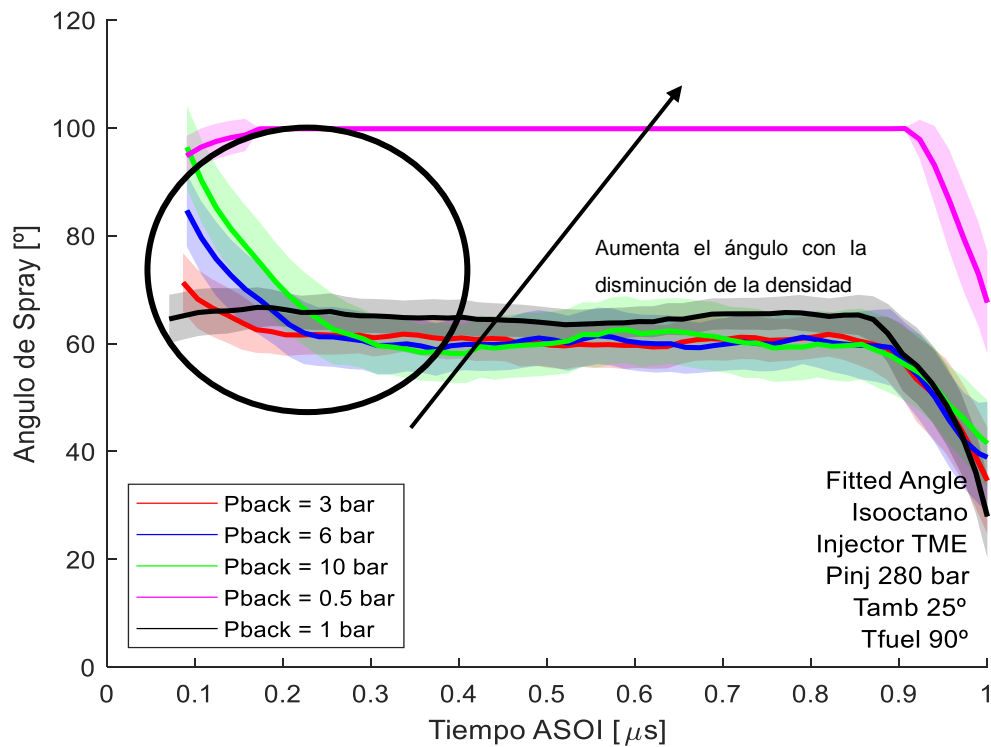
En la figura 85 se representan las diferentes condiciones de densidad con las que se ha experimentado en los ensayos con respecto al tiempo ASOI. Se evalúa los ángulos de spray en las diferentes condiciones ambientales de la cámara. En cada una de las gráficas se mantiene la presión de inyección constante en 200 bar, la temperatura de la cámara se sitúa en  $25^\circ\text{C}$  (298 K).



85. Evaluación de ángulos: representación de los ángulos de chorro de Spray en diferentes condiciones de densidad en función del tiempo y a una presión de inyección de 200 bar. Temperatura ambiente 25°. Temperatura fuel 90° C (363 K). Fuente: Elaboración propia.

En rasgos generales, se puede apreciar que las tendencias son las esperadas, un mayor ángulo para la densidad de 2 Kg/m<sup>3</sup> respecto al resto de puntos. Queda demostrado también la estabilización del chorro a partir de 0.3 μs, esto conlleva una mejor atomización y mezclado.

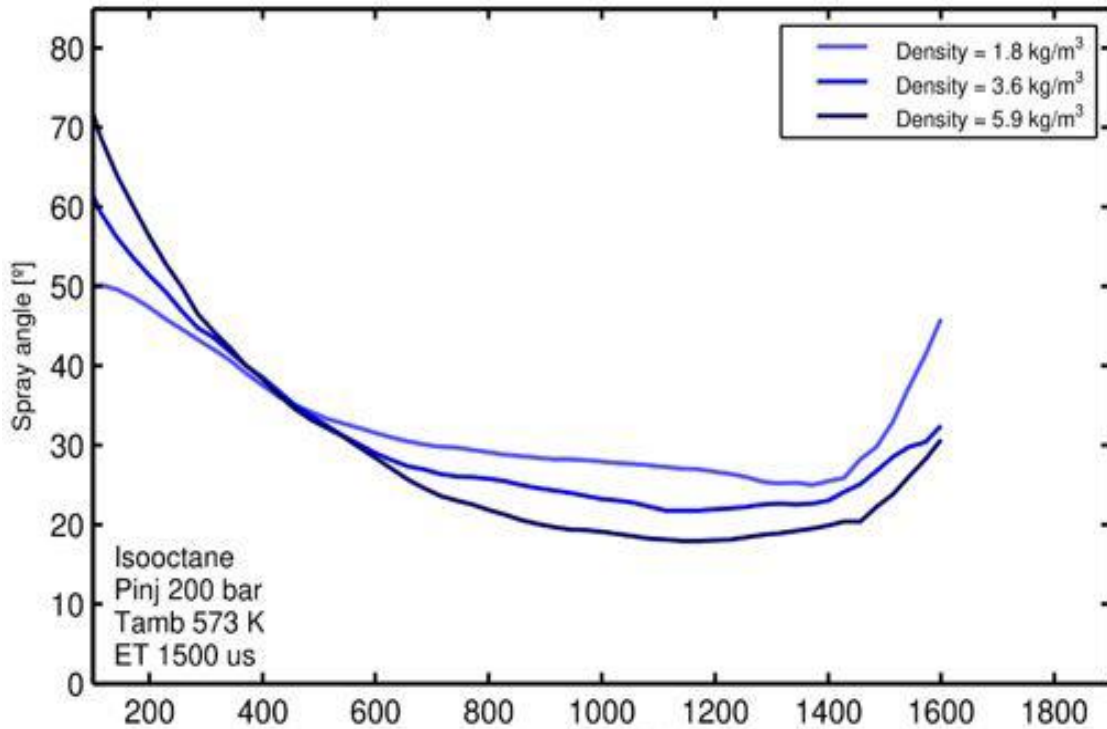
Sin embargo, se aprecia una diferencia de la condición de mayor densidad con respecto a las tres condiciones inferiores. Y es que, si al inicio de la inyección tiene altos valores de ángulo (cercanos a los 90°) después disminuye bruscamente en comparación con las otras condiciones hasta estar por debajo de estas incluso (en 0.8 μs se puede apreciar ángulos de 55° mientras que el resto está en 60°). El fenómeno que aparece aquí ha sido tratado en varios trabajos y tesis, de los cuales le han llamado como colapso de Spray o “*Spray Collapse*”.



86. Evaluación de ángulos: representación de los ángulos de chorro de Spray en diferentes condiciones de densidad en función del tiempo y a una presión de inyección de 280 bar. Temperatura ambiente 25° C (298 K). Temperatura fuel 90°. Fuente: Elaboración propia.

Esa apreciación se vuelve a producir si la presión de inyección sube a 280 bar imagen 86.

Para confirmar que se trata de este fenómeno se van recoger extractos de otros trabajos que hablan de lo mismo. Uno de ellos ya salió anteriormente Daniele Arduino de la Universidad Politécnica de Valencia “*experimental study of gasoline direct injection under spray collapse conditions*” año 2019 [74].



87. Evaluación de ángulos: representación de los ángulos de chorro de Spray en diferentes condiciones de densidad en función del tiempo y a una presión de inyección de 200 bar. Temperatura ambiente 300° C (573 K) Fuente: [74].

Como también se puede observar en la imagen 87 “es evidente que un mayor valor de densidad se acompaña de un ángulo de atomización más pequeño. La tendencia esperada debería ser que a medida que aumenta la densidad ambiental, se deben detectar ángulos de atomización mayores.

Según la ley de gas ideal ecuación (13):

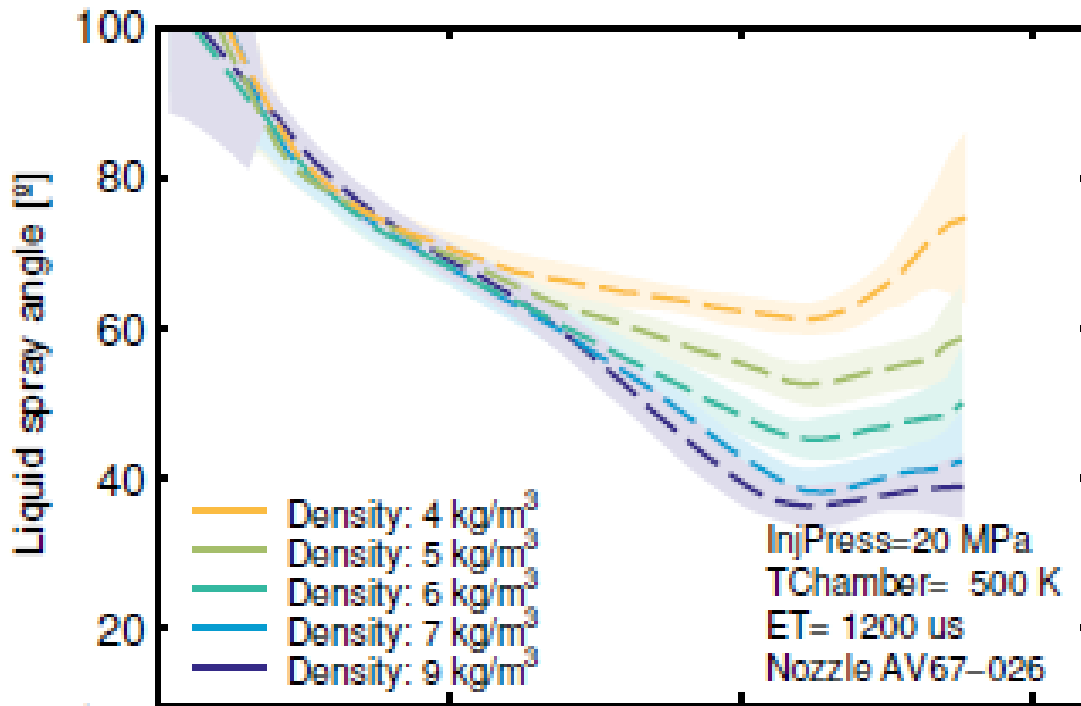
$$p_{amb} \sim \rho_{mb} * T_{amb}$$

(13)

El aumento de la densidad significa un aumento de la presión ambiental, lo que conduce a un freno anticipado de la atomización, con una consecuente menor penetración y ángulos más grandes. Esto es cierto, en esta investigación, solo para la primera parte de la inyección, es decir, hasta aproximadamente 400 s ASOI, a 573 K. Después, es evidente una inversión de la tendencia. Sin embargo, si solo se consideró una columna de atomización (y no un cono de atomización compuesto por varias plumas, como en la investigación)” [74].

Para esta investigación no se ha podido estudiar el efecto que produce la temperatura a presiones subatmosféricas, lo cual puede aclarar varios fenómenos que acompañan a este, como es el caso de ebullición instantánea o “Flash boiling”.

Según se explica en la tesis [1]:



88. Evaluación de ángulos: representación de los ángulos de chorro de Spray en diferentes condiciones de densidad en función del tiempo y a una presión de inyección de 200 bar. Temperatura ambiente 227° C (500 K). Fuente: [1].

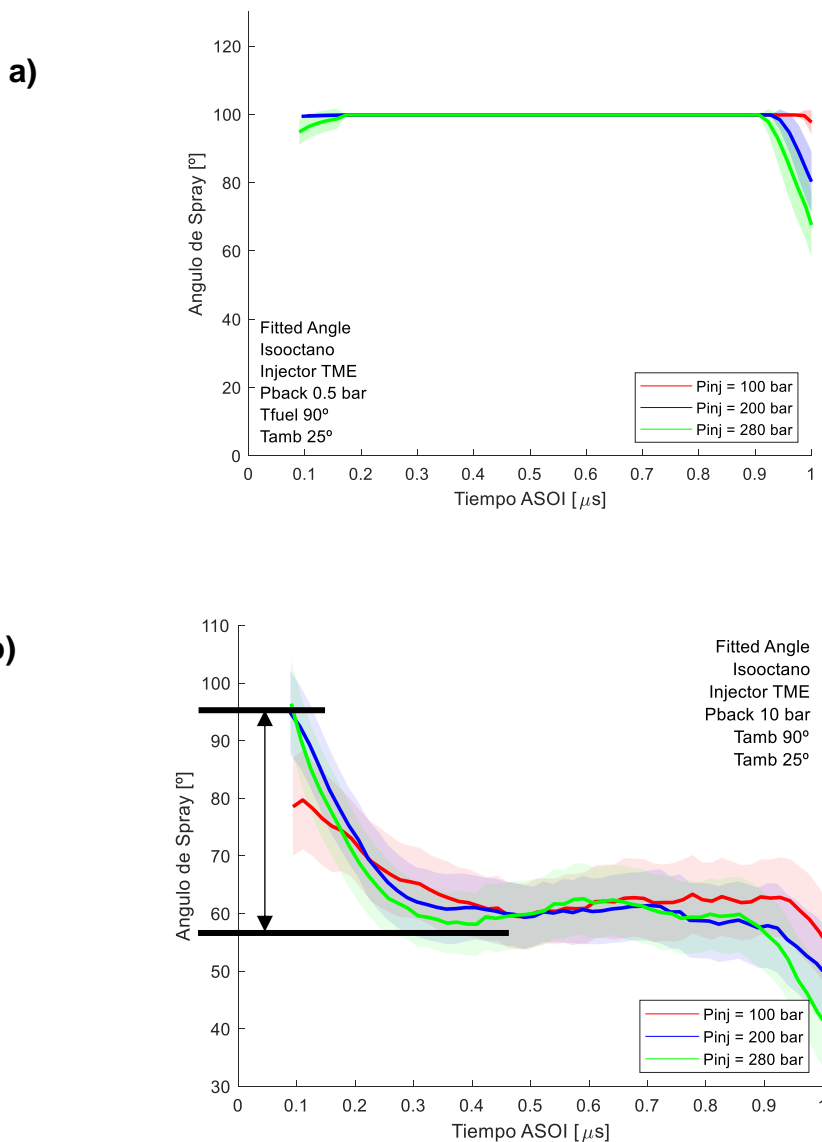
“Se puede observar en la imagen 88 que incluso en el caso de baja temperatura, un mayor valor de densidad se acompaña de un ángulo de atomización más pequeño, lo que sugiere que todavía se produce un colapso de la atomización a 500 K (aunque en un pequeño grado). El observado en el caso de 700 K (gráfico inferior) no es suficiente para crear un efecto suficientemente grande en la penetración de la atomización” [1].

Se obtiene que ambos trabajos llegan a los mismos resultados



### 5.5.3. Efecto de la presión ambiente

Se representa dos graficas a continuación en a imagen 89. La gráfica a) se representa el ángulo de chorro en función del tiempo ASOI para diferentes presiones de inyección y a presión ambiente 0.5 bar. En la gráfica b) se representa el ángulo de chorro en función del tiempo ASOI para diferentes presiones de inyección y a presión ambiente 10 bar. Ambos tienen temperatura ambiente 25°C (298 K).



89. Evaluación de ángulos: representación de los ángulos de chorro de Spray en diferentes condiciones de presión de inyección en función del tiempo. Arriba a) Presión ambiente 0.5 bar. Abajo b) Presión ambiente 10 bar. Temperatura fuel 90° (363 K). Temperatura ambiente 25° C (298 K). Fuente: Elaboración propia.

En rasgos generales se puede afirmar que a medida que disminuye la presión ambiente el ángulo de chorro se ensancha.

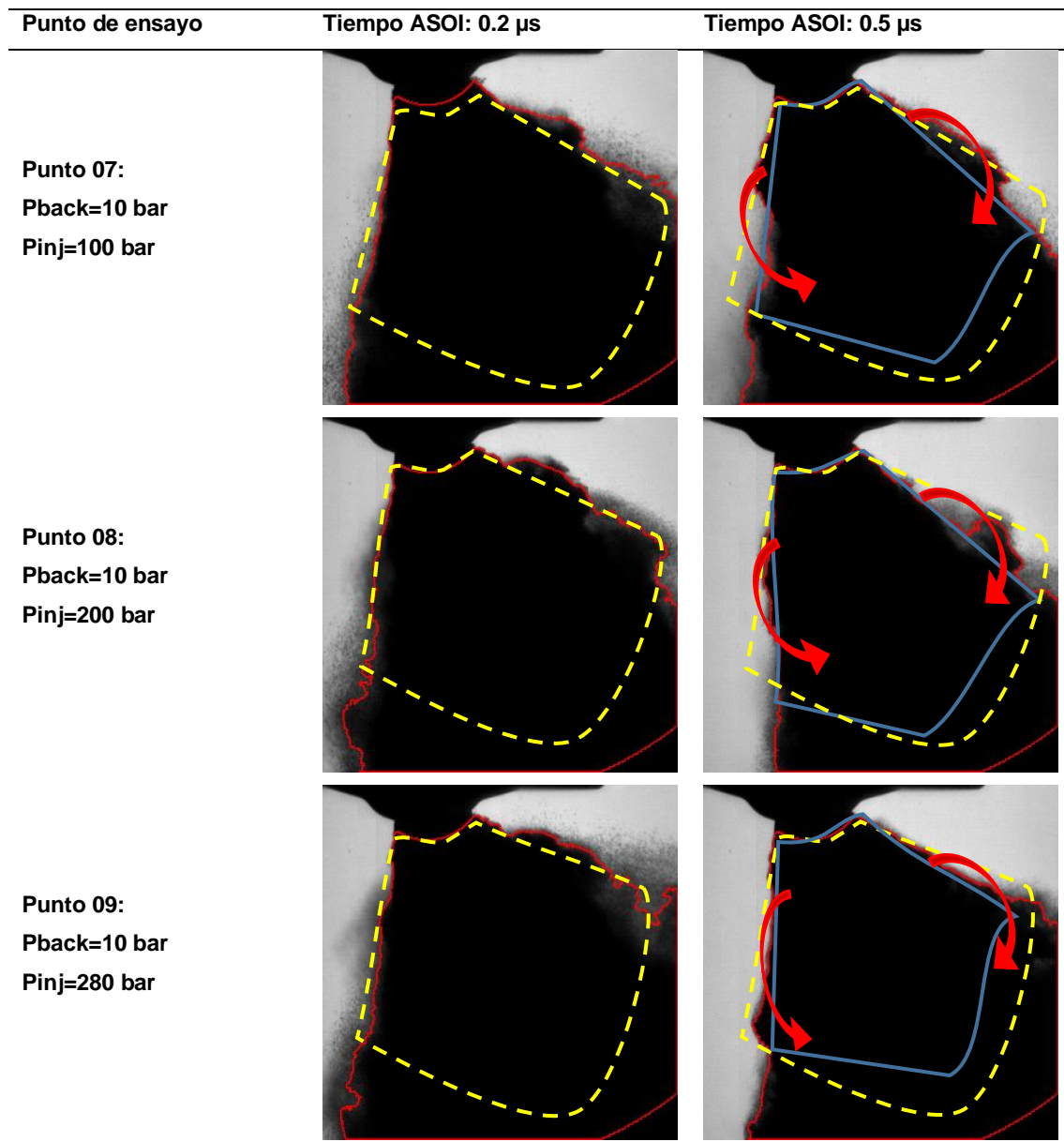
Tras lo observado en las gráficas anteriores, se confirma con estas instantáneas la contracción de la parte intermedia del chorro.

Según se detalla en [1] los efectos del colapso de Spray son varios:

“El colapso de los aerosoles en el caso de alta densidad produce varios efectos que contribuyen a aumentar la penetración axial y cambiar la velocidad de evaporación del aerosol:

1. El impulso de los aerosoles ahora solo se dirige axialmente, lejos del orificio, lo que puede aumentar efectivamente la distancia axial entre el combustible y la punta de la tobera.
2. El ángulo del cono del spray disminuye considerablemente y no se pueden identificar los espráis individuales, lo que reduce el área en contacto con el aire caliente circundante y, en consecuencia, disminuye la velocidad de evaporación.
3. El colapso de los aerosoles hacia el eje del inyector y la disminución de la velocidad de evaporación pueden crear una zona con alta concentración de combustible. Esta zona puede proteger el combustible que aún se inyecta para que no entre en contacto con el aire caliente. Este efecto reduciría significativamente el intercambio de impulso entre las atomizaciones y el gas ambiente y evitaría aún más la evaporación”.

Además, se aprecia la diferencia de angulaje en la imagen 90, de hecho, mientras con presión 0.5 bar se mantiene en sus máximos ángulos, para 10 bar desciende abruptamente en los puntos de estudio como se ve marcado en flechas rojas, especialmente a 280 bar con una diferencia de 40°. Entonces, en la imagen 90 se observa el cono de spray delimitado con la línea amarilla discontinua y después de un tiempo ese cono se ha estrechado delimitado ahora por la línea azul, los puntos se han realizado para presión ambiente 10 bar y presión inyección 100, 200 y 280 bar. Este estrechamiento es motivo probable del fenómeno de *Collapse Spray*. Para confirmar estas evidencias serias necesario ejecutar los mismos experimentos a otras temperaturas.



90. Representación visual de instantáneas a 0.2  $\mu$ s y 0.5  $\mu$ s respectivamente en los puntos de estudio de la gráfica 89. Fuente: Elaboración propia.

## 5.6. Velocidad de penetración

En esta sección se representa la velocidad de penetración de cada punto de ensayo. El algoritmo que se ha hecho es realizar la primera derivada del espacio, en este caso de las distancias de penetración. Las velocidades graficadas sirven para complementar los conocimientos presentados en las secciones anteriores como ya se ha hecho.

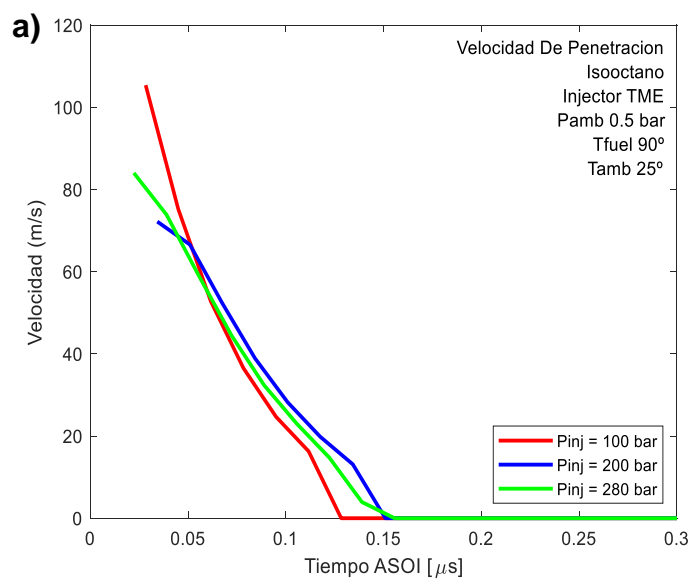
Por otra parte, también son aclaratorias ya que se puede observar y comprender los fenómenos que ocurren y que no se ven con la penetración ni ángulos de chorro.

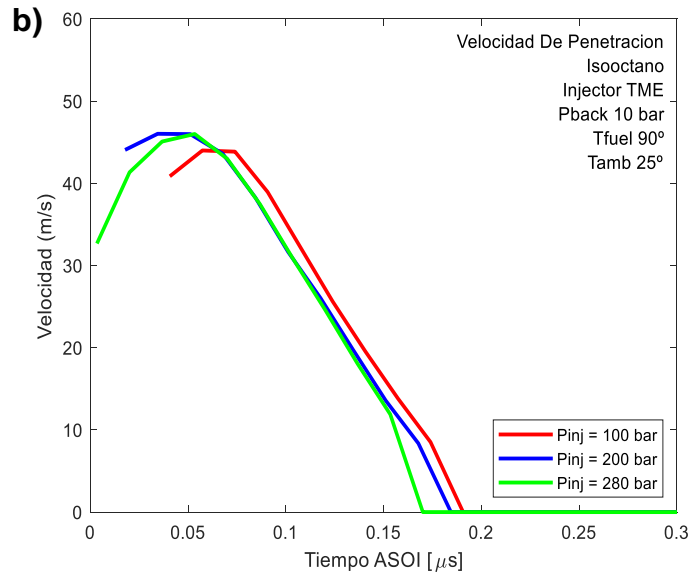
Esta sección se divide en dos apartados

- Efectos de la presión ambiente
- Efectos de la presión de inyección

### 5.6.1. Efectos de la presión ambiente

Se representa en la imagen 91 las velocidades de penetración en función del tiempo ASOI para diferentes condiciones de presión de inyección [100 bar, 200 bar, 280 bar]. Presión ambiente [0.5 bar, 10 bar]. Temperatura fuel 90°. Temperatura ambiente 25° C.





91. Evaluación de velocidades: Representación de las velocidades de penetración en función del tiempo ASOI para diferentes condiciones de presión de inyección. Arriba a) Presión ambiente 0.5 bar. Abajo b) Presión ambiente 10 bar. Fuente: Elaboración propia.

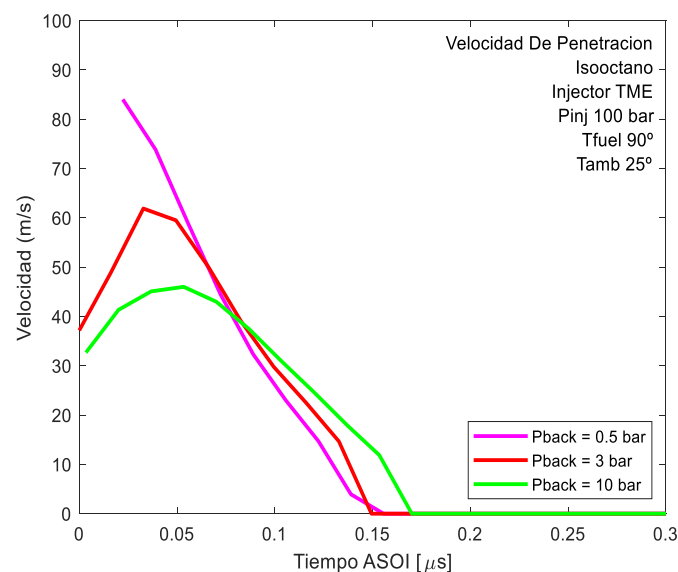
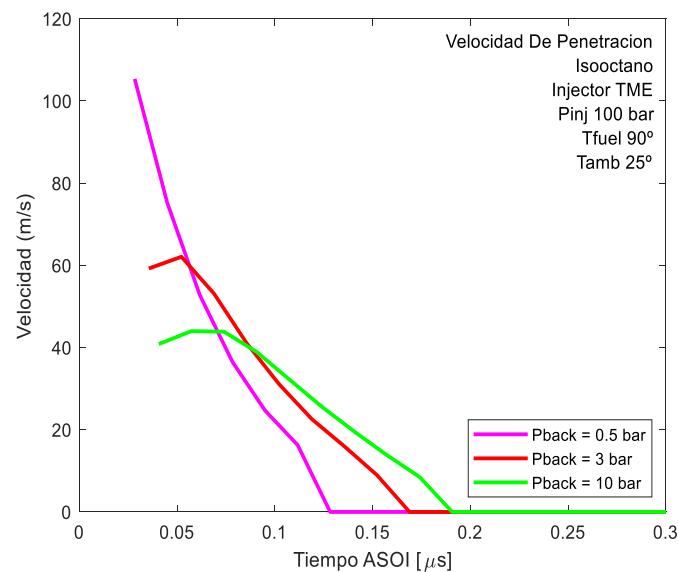
En la gráfica a) se afirma como a presión ambiente 0.5 bar la presión de inyección al principio es mayor que las demás, aunque luego baje. En contra, para una presión mayor 280 bar la velocidad no es la máxima como se cabría pensar. Este fenómeno como se ha comentado ya otra las anteriores secciones son por el efecto de que se forma una onda de compresión al entrar con tanta fuerza lo que disminuya la velocidad y haya pérdidas por compresión

En la gráfica b) se aprecia la diferencia de velocidades entre las presiones 100 bar y 280 bar. En un primer instante la velocidad que lleva la condición 100 bar debería de ser inferior a la condición de 280 bar. Pero se observa lo contrario, lleva más velocidad la condición de presión de inyección de 100 bar. Ese motivo como ya se ha hablado puede ser originado por el fenómeno de colapso de Spray. Ya se ha visto el estrechamiento del chorro en las instantáneas, también se ha comprobado que penetra más y como se reduce el ángulo de chorro. Aun así, no se puede concluir ya que haría falta más experimentos con otras temperaturas para confirmar.

### 5.6.2. Efectos de la presión de inyección

Se representa las velocidades de penetración en función del tiempo ASOI para diferentes condiciones de presión ambiente [0.5 bar, 1 bar, 3 bar, 6 bar, 10 bar]. Presión

de inyección [100 bar, 200 bar, 280 bar]. Temperatura fuel 90° C (363 K). Temperatura ambiente 25° C (298 K).



92. Evaluación de velocidades: Representación de las velocidades de penetración en función del tiempo ASOI para diferentes condiciones de presión ambiente. Arriba a) Presión de inyección de 100 bar. Abajo b) Presión de inyección de 280 bar. Fuente: Elaboración propia.

Se observa en la imagen 92 una clara diferencia de velocidad al inicio de la inyección teniendo presión 0.5 bar a tener 3 o 10 bar. También se observa el brusco descenso de velocidad para la presión 0.5 bar respecto a las demás presiones.

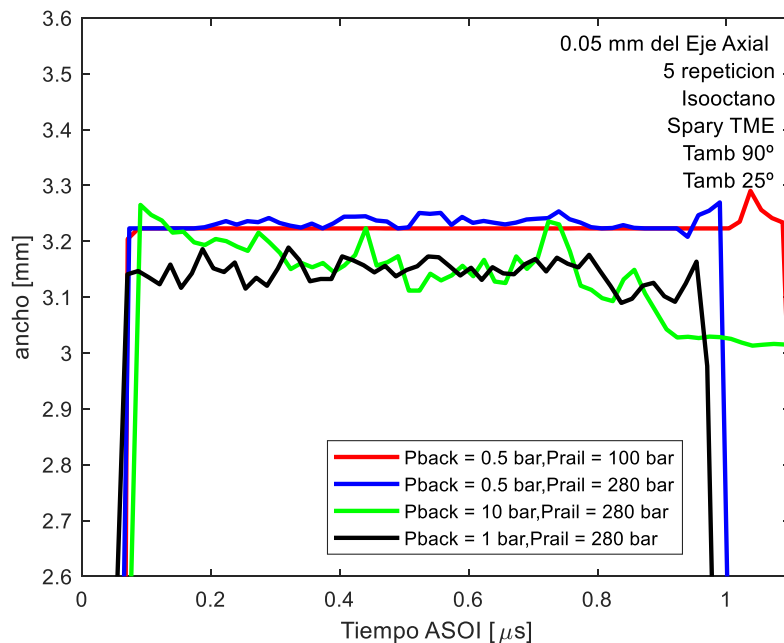
Esta afirmación coincide con el hecho de la rápida atomización que se produce y expansión para 0.5 bar, es decir, se produce más fricción aire-fuel y también mayor

superficie de resistencia o drag. Esta resistencia rompe el vínculo de chorro de spray y lo atomiza en gotitas más pequeñas.

## 5.7. Ancho de Spray

Es esta sección se estudia en ancho de cada punto de estudio en 0.05 mm respecto del eje axial. La distancia de estudio respecto del radio de salida del chorro es el más aconsejable porque en este estudio se centra en campo cercano.

La representación es de los puntos más influyentes imagen 93.



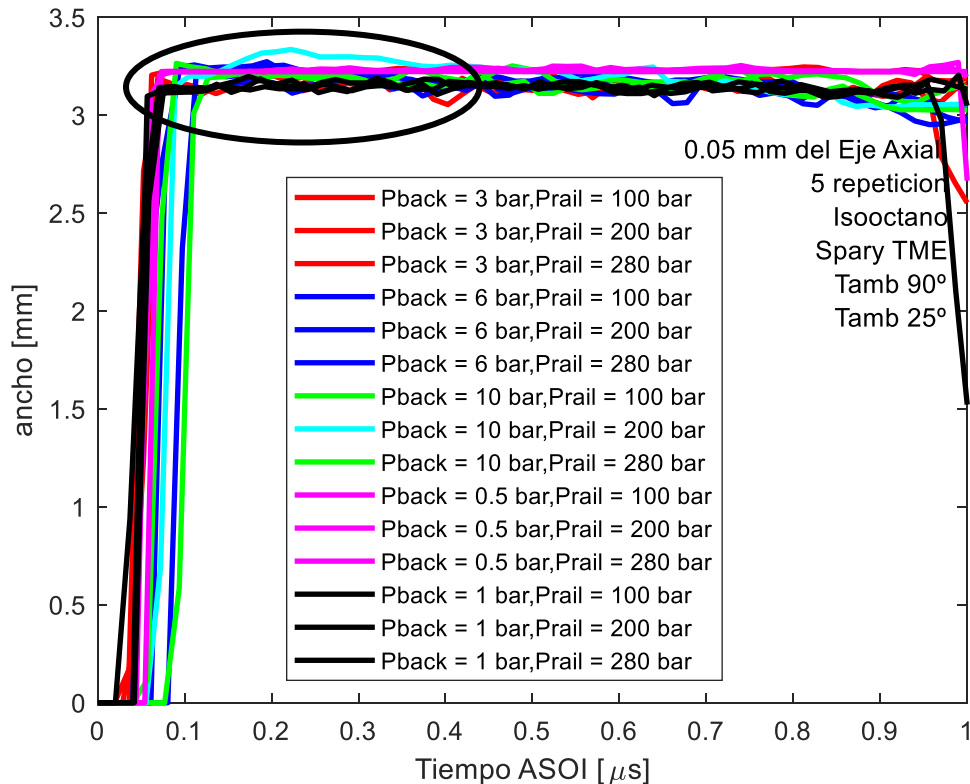
93. Evaluación de ancho de chorro: se representa los anchos de chorro de algunas condiciones de ensayo en función del tiempo. Las medidas están tomadas a 0.05 mm del final de la cabeza del inyector en el eje axial. Se ha tomado las instantáneas en la 5ª repetición de 10°. Temperatura fuel 90° (363 K) Temperatura ambiente 25° C (298 K). Fuente: Elaboración propia.

Se ha puesto la condición de color negro como referencia. Se puede observar en la imagen 93 para la condición de color verde como toca el máximo de todos los muestrarios para luego en poco tiempo tener el menor ancho y estrecharse. Mientras en el resto de puntos de muestra mantienen sus valores cuasi estáticos.

Respecto a los puntos de medida de presión subatmosféricos se explica lo siguiente:

- La diferencia clara de expansión del spray en subatmosférico frente a nivel atmosférico.

- Dentro de la presión subatmosférica el máximo ancho se alcanza antes a 100 bar que a 280 bar.



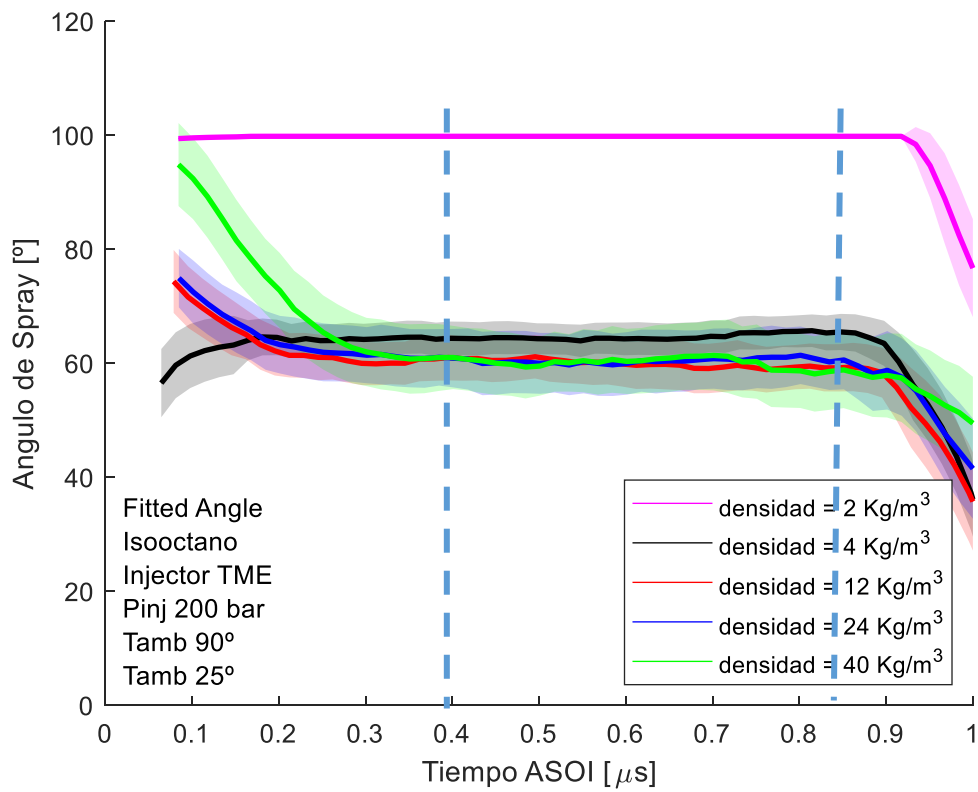
94. Evaluación de ancho de chorro: se representa los anchos de chorro en función del tiempo. Las medidas están tomadas a 0.05 mm del final de la cabeza del inyector en el eje axial. Se ha tomado las instantáneas en la 5ª repetición de 10°. Temperatura fuel 90°C (363 K) Temperatura ambiente 25° C (298 K). Fuente: Elaboración propia.

En la gráfica 94 se indica distinguiendo la condición de ensayo de color cyan y marcando con una elipse negra la zona donde esa condición se ha salido del umbral ya que el resto de medidas mantienen el mismo limite. Este fallo es cometido al movimiento de la cámara en el momento en el que se estaba realizando el ensayo experimental de ese punto.

## 5.8. Ángulos de estabilización

Para la evaluación de los ángulos de estabilización se ha realizado un estudio básico donde se comprobó, primeramente, cual es el intervalo de tiempo en el cual el cono de spray del chorro esta ya estabilizado. Se representa a continuación imagen 95:



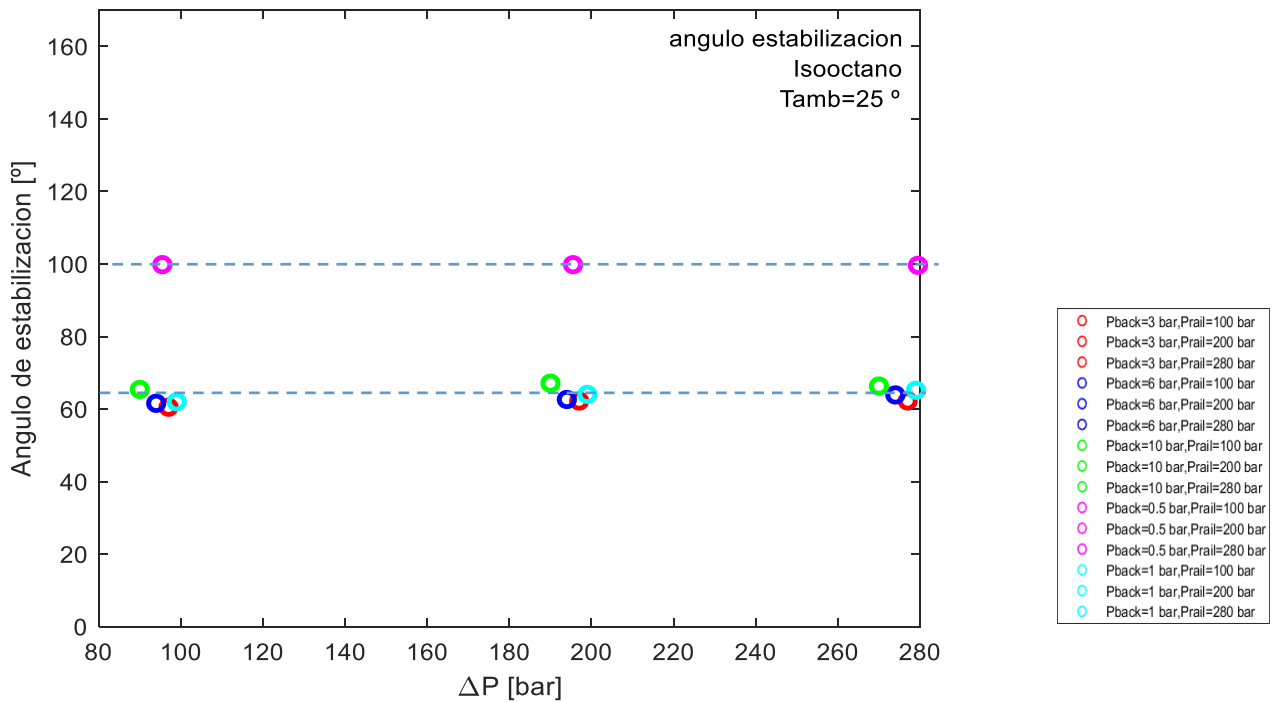


95. Ángulos de estabilización. Se indican con líneas azules discontinuas los intervalos de tiempo en el que los ángulos permanecen estables. Se ha aplicado el método corroborado Fitted Angle (FitS1). Fuente: Elaboración propia

El Tiempo intervalo ASOI de estabilización comprende

Tiempo ASOI: [0.4167 – 0.85]  $\mu\text{s}$

Seguidamente se realiza la media ponderada de todos los valores comprendidos en ese intervalo y se representan a continuación.



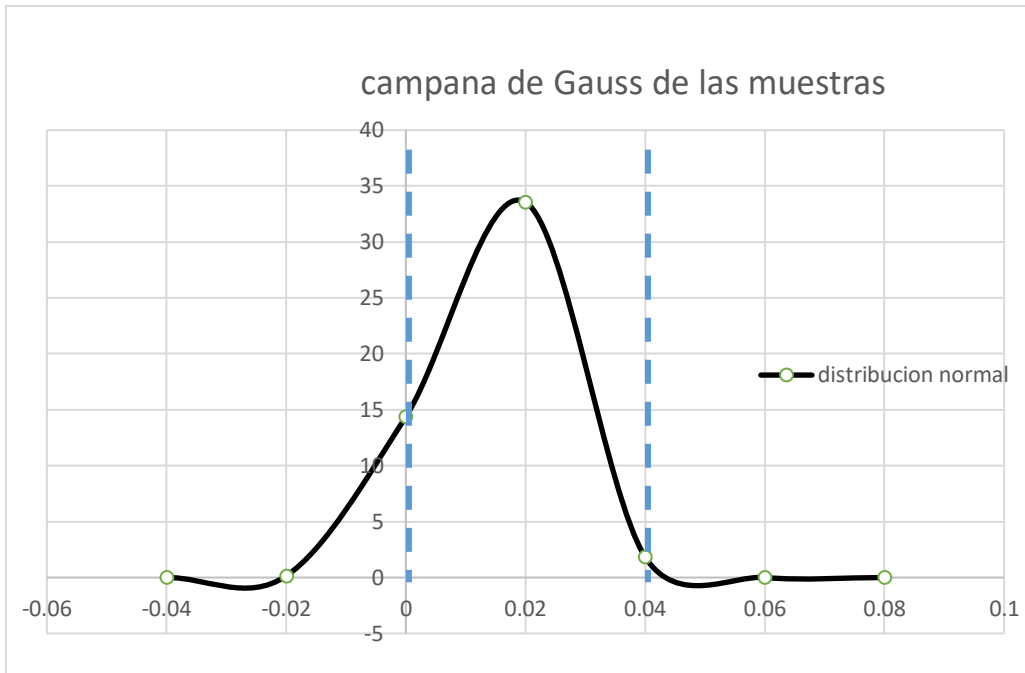
96. Ángulos de estabilización. Se representa los ángulos de estabilización de todas condiciones de estudio en función de la diferencia de presión. Fuente: Elaboración propia.

Se observa en la imagen 96 claramente que los ángulos de estabilización de los puntos de presión subatmosférica ( $\approx 100^\circ$ ) en el tiempo de la inyección son mayores que los puntos de presión atmosférica o sobre-atmosférica ( $\approx 62^\circ$ ).

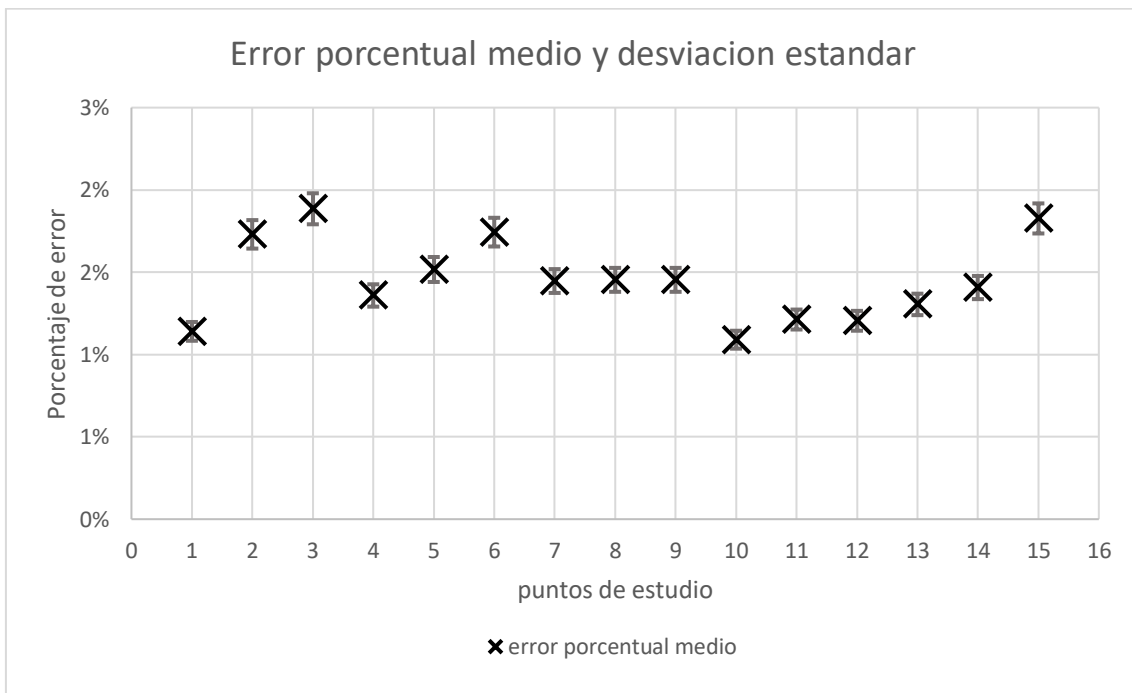
## 5.9. Error de Desviación estándar de penetración

El error de desviación estándar indica la el tamaño de incertidumbre que se ha cometido en los ensayos. Esta incertidumbre se traduce como una estimación que se hace del error cometido. Cuanto más grande sea el tamaño de incertidumbre mayor será el error en forma de porcentaje.

A continuación, se muestra la gráfica que representa la distribución de error muestral en la famosa campana de Gauss. También se muestra la gráfica que representa el error porcentual en los diferentes puntos de ensayo experimental de este trabajo:



97. representación de la distribución de error muestral en la famosa campana de Gauss. Las líneas azules discontinuas representan el intervalo de confianza al  $1\sigma$ . Fuente: Elaboración propia.



98. representación del error porcentual en los diferentes puntos de ensayo experimental de este trabajo. En equis negrita es el error en porcentaje del error medio de los 10 ensayos de cada punto de ensayo. Fuente: Elaboración propia.

En la gráfica 97 se observa la campana de Gauss de las muestras, se ve que apenas no hay dispersión de error cometido con un intervalo de confianza  $1\sigma$ . En cuanto a la exactitud, las medidas son más exactas cuanto más pequeño es el error cometido.

También se valora la precisión, esto significa, a la separación entre las diferentes medidas de una cierta magnitud. Por tanto, la distribución de las muestras recogidas de los ensayos es precisas y exactas ya que: la tasa de error es baja y tanto la exactitud como la precisión son altas.

En la gráfica 98 se ha producido errores ceca del 2% en los puntos 2,3 y 18. Pero el resto de errores cometidos están concentrados entre 1 y el 2%. Se puede observar el error o desviación estándar que se ha cometido en cada una de los puntos de prueba. En equis negrita se ha representado el error en porcentaje del error medio de los 10 ensayos de cada punto de ensayo.

## Capítulo 6

---

# 6. Conclusiones

---

Este capítulo tiene como objetivo resumir el trabajo realizado y presentado a lo largo del documento, delineando las principales conclusiones extraídas

En este trabajo se ha investigado el sistema de inyección para motores GDi (Gasolina de Inyección Directa) como nuevo método a sustituir al anterior sistema de inyección PFi (Inyección por puerto o en conducto). La principal diferencia es que el inyector se encuentra en la propia cámara de combustión. Este contexto tiene como consecuencias que la inyección no está protegida en condiciones ambiente, sino que se inyecta en un ambiente con tendencia a mayor turbulencia, estocástico principalmente con un tiempo muy reducido para realizar el evento de inyección. Por este motivo, entre otros, ha sido realizado este trabajo, para descubrir cual es el comportamiento de la inyección ante condiciones ambientales extremas de la cámara de combustión.

Para comprender estas situaciones en el motor y en la inyección se ha tratado en un capítulo 3 entero la metodología física, así como las características hasta el momento conocidas y propiedades que aparecen. Así entonces, se ha hablado desde el punto de vista teórico físico, el funcionamiento de un motor, el sistema de inyección, la vinculación y movimiento de arrastre del aire en la cámara de combustión y comentarios específicos de los fenómenos físico que hasta el día de hoy otros investigadores han logrado descubrir, teniendo el mismo propósito lazo en común entre esas investigaciones y este.

Para esta acometida, se diseñó y se construyó una maqueta para experimentar la inyección en una cámara acristalada para que se pueda grabar simulando la cámara de combustión del motor. Todo el procedimiento se ha descrito con detalle objetivo en el capítulo 4. Además, se ha requerido de conocimientos en óptica para la grabación de los experimentos por el motivo de que las duraciones de las inyecciones son de apenas micro segundos, cosa que el ojo humano es imposible de visualizar y poder analizar. Por tanto, se añadió a la maqueta experimental el conjunto de sistemas ópticos compuesto principalmente por tres cámaras de alta velocidad, cada uno con una técnica especial de captación de imágenes estas son: MIE, DBI, Schlieren. La localización de cada una debe de ser la adecuada, por eso se ha añadido en el capítulo de Anexos: Anexo C: Planos Descriptivos la localización de cada cámara exactamente, así como de los accesorios de apoyo y filtros.

Este trabajo ha experimentado en el sistema de inyección en campo cercano, esto quiere decir, que se centra la investigación en lo que ocurre desde que el chorro sale de los orificios del inyector TME (Inyector especial para GDi y esta investigación) hasta unos milímetros de penetración en la cámara, obviando lo que suceda después porque eso ya sería campo lejano.

Con los experimentos finalizados y grabados exitosamente se procedió al procesamiento de las imágenes y extracción de datos. Este análisis es avanzado porque se utiliza softwares matemáticos, algoritmos y códigos de procesamiento y compilación ya está también descrito a aclarado punto por punto en el trabajo.

A continuación, se comenta los hallazgos que se han descubierto en esta investigación, así como también posibles confirmaciones con otros trabajos semejantes. Para que sean claras y precisas las conclusiones, se van a redactar primero comentarios generales y ya luego conclusiones que se han logrado averiguar:

Primeramente, los datos que se han ido extrayendo en este trabajo se han contrastado con otros autores e investigadores, así como trabajos relacionados siendo esta corroboración valorada de forma positiva. La tendencia de los resultados es la esperada y se confirma la validez de los datos.

Desde el punto de visto medioambiental, en este estudio al igual que otros semejantes se busca la finalidad de que la inyección sea lo más eficaz alcanzando altos rendimientos y conseguir que las perdidas por combustión pobre o no combustión sean mínimas o nulas. Aunque los estudios no se especifiquen la cantidad de contaminantes se generan o cuanto fuel residual no se ha quemado porque no está dentro del tema de este trabajo.

En este presente trabajo se han llegado a las siguientes conclusiones generales:

En rasgos generales, se ha comprobado que a medida que la presión ambiente desciende de 10 bar a 1 bar los ángulos de chorro de Spray aumentan mientras que la distancia de penetración disminuye de manera considerable para una presión de inyección del inyector constante. Además, se ha observado una clara diferencia de las anteriores tomas de presiones con la presión de ambiente 0.5 bar. Es decir, las propiedades físicas cambian totalmente logrando con esta presión las distancias de penetración en el menor tiempo y los máximos ángulos de chorro de espray. En este punto, se ha comprobado con respecto al resto de condiciones la diferencia de ángulos, cuando se estabiliza la inyección, de 40°.

En cuanto a las velocidades generadas se determina son superiores con presión ambiente 0.5 bar al resto de presiones y pasa con el resto de presiones de inyección. Luego, se puede concluir, se ha encontrado una atomización en estado de cuasivapor de presión ambiente en la cámara de 0.5 bar (subatmosférica). Esta es rápida, imprecisa e incontrolada.

Por otro lado, se ha encontrado una atomización en estado líquido para presiones en cámara de 1,3,6,10 bar. Esta es lenta, precisa y controlada. Para presión ambiente 0.5 bar favorece la atomización ya que se expande mejor el fuel, pero esta conclusión no se puede dar como acertada y definitiva ya que hace falta el estudio de otros factores como cambios de temperatura.

A continuación, se detalla las conclusiones específicas de este presente trabajo:

Se ha determinado una anomalía denominada bloqueo de contrapresión producido por el efecto de succión en las condiciones ambiente entre 100 bar y 280 bar en la condición ambiente en la cámara 0.5 bar. Esta circunstancia se ha descubierto en varios aspectos. Por un lado, en cuanto a penetración tarda más en penetrar a 280 bar que a 100 bar. Por otro lado, en cuanto a la velocidad se ha observado una reducción significativa a 280 bar respecto a 100 bar. Este fenómeno genera como consecuencia una onda de contrapresión que frena la inyección produciendo una expansión por los bordes y alejándose del eje axial lo que se confirma si se ve que los ángulos son demasiados elevados.

Se ha determinado también la existencia de una anomalía en la condición de punto de ensayo numero 09 con las siguientes características:

Presión ambiente: 10 bar

Presión de inyección: 280 bar

En dicha anomalía se ha descubierto varios aspectos. Desde el punto de vista de ángulo se observa al inicio un alto ángulo para en un breve tiempo descender 40° menos hasta llegar al mínimo si se compara con otras mismas condiciones de inyección. Desde el

punto de vista de la velocidad, se aprecia la diferencia de velocidades entre las presiones 100 bar y 280 bar. En un primer instante la velocidad que lleva la condición 100 bar debería de ser inferior a la condición de 280 bar. Pero se observa lo contrario, lleva mas velocidad la condición de presión de inyección de 100 bar. También se observa en cuanto a penetración, como a 280 bar penetra antes que con 100 bar. Este hecho puede ser motivo de que se estreche el ángulo de chorro. Si se visualiza las imágenes se puede comprobar como efectivamente se estrecha el chorro del Spray. Estas consecuencias que se han descubierto, los investigadores lo denominan “Spray Collapse”. Es difícil concretar que sea ese el fenómeno ya que haría falta realizar más experimentos, sobre todo con cambios de temperatura.



## Capítulo 7

---

# 7. Líneas de Trabajo Futuras

---

El medio ambiente está sufriendo alteraciones por culpa de la mano del ser humano tal y como expertos y científicos llevan años observando y alertando. Por otro lado, el mundo de la automoción también está sufriendo cambios considerables con el fin de, por la parte de los coches, sean menos contaminantes, pero la infraestructura mundial actual no puede soportar ese cambio que sería la sustitución del motor de combustión al eléctrico. Mientras se produce esa transición de aquí a 30 o 40 años, se va a seguir investigando en tratar de que el motor de combustión interna de gasolina contamine menos y sea lo mas eficiente posible.

En este trabajo de investigación se ha podido aportar y avanzar ligeramente hacia ese fin pero todavía quedan algunas dudas o problemas y que no se han podido resolver debido a una situación excepcional como es la crisis sociohumanitaria, sanitaria y económica del virus Covid-19 o comúnmente llamado "Coronavirus".

Estas dudas son sobre todo

- Como afectaría un cambio de temperatura en las mismas condiciones de experimentación y también descubrir en el caso de que se produzca el Colapso de Spray si es verdad que se produce una condensación o bajada de temperatura cerca del eje axial del inyector.

- También se pueden investigar con los combustibles descritos en este trabajo y otros.
- Diferentes geometrías de tobera y de orificios. (diámetro, cónicos, esféricos etc.)
- Diferentes distribuciones de los orificios y cómo afectaría eso al collapse.
- Las técnicas ópticas utilizadas para el spray se podrían utilizar para mejorar el conocimiento y contribuir en la pandemia de covid-19, utilizar con un *dummie* para simular tos o estornudos y evaluar la eficiencia de varias mascarillas. Ya que la metodología del experimento sería muy similar a la del estudio del spray de combustible.

Este trabajo conforma una pieza del gigantesco puzle de la inyección, cada investigación y descubrimiento proporciona una gran fuente de información para aquellos futuros estudiantes e investigadores que se embarquen en este campo como es la inyección.

## Capítulo 8

---

## 8. Bibliografía

---

- [1] D. Vaquerizo, "Study on Advanced Spray-Guided Gasoline Direct Injection Systems," no. September, 2017.
- [2] "Organización Internacional de Fabricantes de Vehículos Motorizados," *OICA*, 2019. [Online]. Available: <http://www.oica.net/>.
- [3] "Causas | Hechos - Cambio climático: signos vitales del planeta." [Online]. Available: <https://climate.nasa.gov/causes/>. [Accessed: 05-Mar-2020].
- [4] "Gráfico del día: emisiones de carbono y población humana, 1751-2013 - Desdemona Despair." [Online]. Available: <https://desdemonadespair.net/2015/06/graph-of-day-carbon-emissions-and-human.html>. [Accessed: 21-May-2020].
- [5] S. D. J. P. Galasyn, "Census Bureau." .
- [6] BBC, "Cambio climático: los 6 gráficos que muestran el estado actual del calentamiento global," 2018. [Online]. Available: <https://www.bbc.com/mundo/noticias-46426822>. [Accessed: 05-Mar-2020].
- [7] N. Abram *et al.*, "Avash Pandey (Nepal)," Phillip Williamson.
- [8] "Reducciones históricas en la extensión del hielo marino del Ártico," 2019. [Online]. Available: <https://www.unenvironment.org/es/noticias-y>

- 
- reportajes/reportajes/reducciones-historicas-en-la-extension-del-hielo-marino-del-artico. [Accessed: 05-Mar-2020].
- [9] K. R. Pullen, S. Etemad, W. E. Thornton, and J. Villegas, "The TurboClaw® compressor for engine downsizing by twin-charging," in *Institution of Mechanical Engineers - 7th International Conference on Compressors and Their Systems 2011*, 2011, pp. 93–99.
- [10] E. L. Parlamento and E. El Consejo, "ES UNIÓN EUROPEA."
- [11] UE, "Emisiones de CO2 de los coches: hechos y cifras (infografía) | Noticias | Parlamento Europeo," 2019. [Online]. Available: <https://www.europarl.europa.eu/news/es/headlines/society/20190313STO31218/emisiones-de-co2-de-los-coches-hechos-y-cifras-infografia>. [Accessed: 05-Mar-2020].
- [12] J. B. Heywood, *Internal Combustion Engine Fundamentals*, 1º Edición. McGraw-Hill, 1988.
- [13] H. and L. Zhao, *Automotive gasoline direct injection engines*, 1º Edición. Pergamon, 1999.
- [14] S. Pischinger, J. Schnitzler, M. Rottmann, H. Busch, and F. Fricke, "Future of Combustion Engines," *Europe*, no. 724, pp. 776–790, 2006.
- [15] Robertson, "Diesel overtakes gasoline car sales in Europe," *Diesel Fuel News*, vol. 10, 2006.
- [16] Wood, "Institutional Repository Optical investigations of the sprays generated by gasoline multi-hole injectors under novel operating conditions This item was submitted to Loughborough University as a PhD thesis by the," p. 237, 2014.
- [17] Albrodpulf1, "Análisis Técnico motor Gasolina – Par motor – Torque," 2014. [Online]. Available: <https://albrodpulf1.wordpress.com/2014/04/14/analisis-par-motor-torque/>. [Accessed: 05-Mar-2020].
- [18] Mercedes, "The 'Oil Motor" - Mercedes-Benz Diesels - Automotive Tech Info," 2002. [Online]. Available: <https://automotivetechinfo.com/2002/09/oil-motor-mercedes-benz-diesels/>. [Accessed: 05-Mar-2020].
- [19] D. Murias, "La batería del millón de millas para coches eléctricos Tesla podría estar en camino, si esta patente dice lo que parece decir," *Motorpasión*, 2019. [Online]. Available: <https://www.motorpasion.com/industria/bateria-millon-millas-para-coches-electricos-tesla-podria-ser-realidad>. [Accessed: 11-Mar-2020].
- [20] R. Payri, F. J. Salvador, P. Martí-Aldaraví, and D. Vaquerizo, "ECN Spray G external spray visualization and spray collapse description through penetration and morphology analysis," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 112, pp. 304–316, 2017.
-

- [21] R. PAYRI MARIN, J. R. SERRANO CRUZ, B. V. TORMOS MARTINEZ, and A. GOMEZ VILANOVA, "Una Reflexion Objetiva Del Potencial Futuro De Los Vehiculos Diesel Frente a Los Argumentos Basados En El Populismo Energético," *Dyna Ing. E Ind.*, vol. 94, no. 1, pp. 480–482, 2019.
- [22] J. R. Serrano, R. Payri, B. Tormos, and A. Gomez, "Boletín de Noticias de Automoción Especial Vacaciones Agosto 2019."
- [23] Bp, "Revisión estadística de la energía mundial | Economía energética | Casa." [Online]. Available: <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>. [Accessed: 11-Apr-2020].
- [24] P. Europeo, "Reducir las emisiones de los automóviles: nuevos objetivos de CO2." [Online]. Available: <https://www.europarl.europa.eu/news/es/headlines/society/20180920STO14027/reducir-las-emisiones-de-los-automoviles-nuevos-objetivos-de-co2>. [Accessed: 11-Apr-2020].
- [25] Repository, "Institutional Repository Optical investigations of the sprays generated by gasoline multi-hole injectors under novel operating conditions This item was submitted to Loughborough University as a PhD thesis by the."
- [26] F. . J. M. D. Payri, *Motores de combustión interna alternativos*. Valencia: Universitat Politecnica de Valencia (UPV)., 2011.
- [27] H. Heisler, *Advanced Engine Technology*. 1995.
- [28] E. V. Arroyo, *Motores Alternativos I*, 1°. Madrid: Escuela Técnica Superior de Ingenieros Aeronáuticos, Sección de Publicaciones, 2001.
- [29] S. di D. di Ricerca, "THE ENGINE MANAGEMENT SYSTEM FOR GASOLINE AND DIESEL ENGINES," 2010. [Online]. Available: <https://slideplayer.com/slide/614649/>. [Accessed: 03-Apr-2020].
- [30] C. C. Fernández and M. A. S. Rodriguez, "Motores alternativos-Apuntes históricos," 2009.
- [31] comercio y turismo Ministerio de industria and Gobierno de España, "Grandes Inventores - Museo Virtual - Oficina Española de Patentes y Marcas." [Online]. Available: [http://historico.oepm.es/museovirtual/galerias\\_tematicas.php?tipo=INVENTOR](http://historico.oepm.es/museovirtual/galerias_tematicas.php?tipo=INVENTOR). [Accessed: 15-Apr-2020].
- [32] D. Giacosa, *Motores endotermicos*, 1° Edición. 1989.
- [33] M. B. Çelik and B. Özdalyan, "Gasoline direct injection," vol. 1, p. 20, 2000.
- [34] C. C. Fernández and M. A. S. Rodriguez, "Requerimientos de dosado EP," p. 25, 2009.
- [35] Pierburg, "Sondas Lambda del especialista para la reducción de contaminantes."

- 
- [36] J. Reyes, "Simultaneous Imaging of the Diatomic Carbon and Methylidyne Species Radicals for the Quantification of the Fuel to Air Ratio from Low to High Pressure Combustion," 2017.
- [37] U. Carlos, I. I. I. Madrid, and A. Lecuona, "Motores de Combustión Interna," p. 40, 2016.
- [38] Reif, *Gasoline Engine Management*. BOSCH, 2015.
- [39] N. Johansson, S. Hemdal, and P. Dahlander, "Reduction of Soot Formation in an Optical Single-Cylinder Gasoline Direct-Injected Engine Operated in Stratified Mode Using 350 Bar Fuel Injection Pressure, Dual-Coil and High-Frequency Ignition Systems," *SAE Int. J. Engines*, vol. 10, no. 3, 2017.
- [40] H. Husted, T. Spegar, and J. Spakowski, *The Effects of GDi Fuel Pressure on Fuel Economy*. 2014.
- [41] R. de combustión del Motor, "Condición de funcionamiento 'Spray G.'" [Online]. Available: <https://ecn.sandia.gov/gasoline-spray-combustion/target-condition/spray-g-operating-condition/>. [Accessed: 22-May-2020].
- [42] E. C. Network, "Transparent-multi-hole." [Online]. Available: <https://ecn.sandia.gov/gasoline-spray-combustion/computational-method/mesh-and-geometry/>. [Accessed: 22-May-2020].
- [43] Merdes, C. Enderle, G. Vent, and R. Weller, "The New Turbocharged Four-Cylinder Gasoline Engine by Mercedes-Benz," *MTZ Worldw.*, vol. 72, no. 12, pp. 16–23, Dec. 2011.
- [44] Renault, "CÓMO FUNCIONAN LOS CUESTIONARIOS," *renault*, 2020.
- [45] P. Piqueras and A. Tisiera, "TEMA 4 - Sistema de Gestión de Crisis," pp. 1–26, 2020.
- [46] R. C. Rodgers and G. E. Hill, "Equations for vapour pressure versus temperature: Derivation and use of the antoine equation on a hand-held programmable calculator," *Br. J. Anaesth.*, vol. 50, no. 5, pp. 415–424, 1978.
- [47] S. Ohe, "A prediction method of vapor pressures by using boiling point data," *Fluid Phase Equilib.*, vol. 501, p. 112078, 2019.
- [48] H. Guo, B. Wang, Y. Li, H. Xu, and Z. Wu, "Characterizing external flashing jet from single-hole GDI injector," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 121, pp. 924–932, 2018.
- [49] Oiltanking, "Proceso de Refinación de Petróleo," 2016. [Online]. Available: <https://www.oiltanking.com/es/publicaciones/glosario/detalles/term/el-proceso-de-refinacion-de-petroleo.html>. [Accessed: 22-May-2020].
- [50] Carl Roth, "Ficha de datos de seguridad isooctano," *Roth*, vol. 2006, no. 1907, pp. 1–18, 2019.
-

- [51] Carl Roth, "Ficha de datos de seguridad n-Pentano," *Roth*, vol. 2006, no. 1907, p. 17, 2018.
- [52] Carl Roth, "Ficha de datos de seguridad n-Hexano," *Roth*, vol. 2006, no. 1907, p. 18, 2019.
- [53] C. Roth, "Ficha de datos de seguridad n-pentano," *Roth*, vol. 2006, no. 1907, p. 18, 2019.
- [54] R. de combustión del Motor, "Orientación del penacho 'Spray G.'" [Online]. Available: <https://ecn.sandia.gov/gasoline-spray-combustion/target-condition/spray-g-plume-orientation/>. [Accessed: 23-May-2020].
- [55] G. Martínez, "TEMA 10 : CHORRO LÍQUIDO ( SPRAY )," *UPV*, pp. 1–27, 2019.
- [56] T. Y. Makogon, *Handbook of multiphase flow assurance*, 2°. Elsevier, 2019.
- [57] R. D. Reitz and F. V. Bracco, "Mechanisms of breakup of round liquid jets," *Princet. Univ.*, p. 662, 1978.
- [58] S. H. Calvo and C. Cortés Gracia, "Introducción a la turbulencia - capa límite turbulenta," *UPV*, p. 57, 2019.
- [59] Guoning Chen, "Bringing Topology-Based Flow Visualization to the Application Domain," *ResearchGate*, 2009. [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/figure/left-The-swirl-motion-of-flow-in-the-combustion-chamber-of-a-diesel-engine-Swirl-is\\_fig2\\_226450138](https://www.researchgate.net/figure/left-The-swirl-motion-of-flow-in-the-combustion-chamber-of-a-diesel-engine-Swirl-is_fig2_226450138). [Accessed: 20-Apr-2020].
- [60] G. McCabe, "pensamientos iniciales sobre la combustión," *Macabisno*, 2010. [Online]. Available: [http://mccabism.blogspot.com/2010/08/initial-thoughts-on-combustion\\_24.html](http://mccabism.blogspot.com/2010/08/initial-thoughts-on-combustion_24.html). [Accessed: 15-Mar-2020].
- [61] Quora, "What is squish and tumble in IC engine?," 2017. [Online]. Available: <https://www.quora.com/What-is-squish-and-tumble-in-IC-engine>. [Accessed: 25-Apr-2020].
- [62] H. Guo, Y. Li, X. Lu, Z. Zhou, H. Xu, and Z. Wang, "Radial expansion of flash boiling jet and its relationship with spray collapse in gasoline direct injection engine," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 146, no. October 2018, pp. 515–525, 2019.
- [63] Mojtabi, N. Chadwick, G. Wigley, and J. Helie, "The effect of flash boiling on break up and atomization in GDI sprays," *22nd Eur. Conf. Liq. At. Spray Syst.*, pp. 8–10, 2008.
- [64] H. Guo *et al.*, "Effect of flash boiling on microscopic and macroscopic spray characteristics in optical GDI engine," *Fuel*, vol. 190, pp. 79–89, 2017.
- [65] Y. Li, H. Guo, Z. Zhou, Z. Zhang, X. Ma, and L. Chen, "Spray morphology transformation of propane, n-hexane and iso-octane under flash-boiling conditions," *Fuel*, vol. 236, no. August 2018, pp. 677–685, 2019.
-

- 
- [66] D. Kawano, H. Ishii, H. Suzuki, Y. Goto, M. Odaka, and J. Senda, "Numerical study on flash-boiling spray of multicomponent fuel," *Heat Transf. - Asian Res.*, vol. 35, no. 5, pp. 369–385, Jul. 2006.
- [67] B. VanDerWege, "The effects of fuel volatility and operating conditions on sprays from pressure-swirl fuel injectors," *Massachusetts Institute of Technology, Dept. of Mechanical Engineering*, 2005. [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/37606080\\_The\\_effects\\_of\\_fuel\\_volatility\\_and\\_operating\\_conditions\\_on\\_sprays\\_from\\_pressure-swirl\\_fuel\\_injectors](https://www.researchgate.net/publication/37606080_The_effects_of_fuel_volatility_and_operating_conditions_on_sprays_from_pressure-swirl_fuel_injectors). [Accessed: 23-May-2020].
- [68] M. S. PLESSET, "BUBBLE DYNAMICS AND CAVITATION EROSION," *Ann. Rev. Fluid Mech*, vol. 9, no. (AUGUST 20-22, 1973), pp. 145–85, 1973.
- [69] Y. Li *et al.*, "An exploration on collapse mechanism of multi-jet flash-boiling sprays," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 134, no. May 2017, pp. 20–28, 2018.
- [70] H. Guo *et al.*, "Comparison of spray collapses at elevated ambient pressure and flash boiling conditions using multi-hole gasoline direct injector," *Fuel*, vol. 199, pp. 125–134, 2017.
- [71] Viera, "Effect of multiple injection strategies on the diesel spray formation and combustion using optical diagnostics," 2019.
- [72] F. J. Salvador, S. Ruiz, J. Salavert, and J. De La Morena, "Consequences of using biodiesel on the injection and air-fuel mixing processes in diesel engines," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part D J. Automob. Eng.*, vol. 227, no. 8, pp. 1130–1141, 2013.
- [73] J. H. Gladstone and T. Dale, "XVI Researches on the refraction, dispersion, and sensitiveness of liquids," *Philos. Trans. R. Soc. London*, vol. 153, pp. 317–343, Dec. 1863.
- [74] D. Arduino, "DIRECT INJECTION UNDER SPRAY," 2020.
- [75] Y. Li *et al.*, "Morphology analysis on multi-jet flash-boiling sprays under wide ambient pressures," *Fuel*, vol. 211, no. April 2017, pp. 38–47, 2018.
- [76] R. Payri, J. Gimeno, G. Bracho, and D. Vaquerizo, "Study of liquid and vapor phase behavior on Diesel sprays for heavy duty engine nozzles," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 107, pp. 365–378, 2016.
- [77] C. tecnico AEN/CTN, "Criterios generales para la elaboración formal de los documentos que constituyen un proyecto técnico," *UNE*, pp. 6–9, 2014.
- [78] M. de T. y A. S. España, "Real Decreto 488 / 1997 , de 14 de abril , sobre disposiciones mínimas de seguridad y salud relativas al trabajo con equipos que incluyen pantallas de visualización . TEXTO CONSOLIDADO Última modificación : sin modificaciones," *Boletín Of. del Estado*, pp. 1–6, 1997.
-



- [79] BOE, “Ley 31/1995, de 8 de noviembre, de prevención de Riesgos Laborales,” pp. 1–24, 2014.
- [80] B. D. Segura, “NTP 654: Láseres: nueva clasificación del riesgo (UNE EN 60825-1 /A2: 2002),” pp. 1–8, 2002.
- [81] Boletín Oficial del Estado, “Ley 15/2010, de 10 de diciembre, De Prevención De La Contaminación Lumínica Y Del Fomento Del Ahorro Y Eficiencia Energéticos Derivados De Instalaciones De Iluminación,” pp. 108939–108952, 2010.
- [82] U. I. S. O. Iec, E. Del, and D. U. Iso, “Norma Española laboratorios de ensayo y calibración,” pp. 6–9, 2018.
- [83] B. oficial del Estado, *Prevención de riesgos laborales.*, vol. 29, no. 2. 2006.
- [84] S. González Varas Ibáñez, “Derechos Y Obligaciones De Contratistas Y Administracion En La Fase De Ejecución Del Contrato Administrativo.,” *Rev. Estud. la Adm. Local y Autonómica*, no. 285, pp. 179–214, 2011.
- [85] Gobierno de España, “Seguridad Social.” [Online]. Available: <http://www.seg-social.es/wps/portal/wss/internet/Inicio>. [Accessed: 30-May-2020].
- [86] CYPE, “Generador de precios de la construcción de CYPE Ingenieros.” [Online]. Available: <http://generadorprecios.cype.es/>. [Accessed: 30-May-2020].
- [87] E. Optics, “Optics - Imaging - Photonics - Optomechanics - Lasers Edmund Optics.” [Online]. Available: <https://www.edmundoptics.es/>. [Accessed: 30-May-2020]



Documento II

# **Pliego de Condiciones**



## Capítulo 9

---

# 9. Pliego de Condiciones

---

### 9.1. Generalidades

En el presente documento se detalla la normativa aplicable en el cual se ha realizado este Trabajo Final de Master. Constituye pues uno de los documentos básicos del proyecto y contractual en el que la misión es establecer las condiciones técnicas, económicas, administrativas y legales para que el objetivo del proyecto pueda materializarse en las condiciones especificadas, evitando así diferentes interpretaciones de las deseadas. Es te documento además de obligatorio cumplimiento y deberá ser tenido en cuenta en todo el trabajo.

### 9.2. Definiciones y alcance del pliego

Primeramente, el ámbito de aplicación practico de este trabajo se extiende a los ensayos experimentales en el banco de pruebas para inyección directa en gasolina y sus respectivos subsistemas que ha sido construido en el Centro de Motores Térmicos en la universidad Politécnica de Valencia.

Segundo, también existe el ámbito de aplicación teórica que va enlazado con este último, y se extiende a estudio de los datos aprobados en los ensayos procesamiento y resultados de los mismos.

Así pues, el objeto del trabajo es tanto práctico como teórico.

### **9.3. Contenido**

A continuación, se hace referencia a los capítulos y apartados de dicho pliego de condiciones con el fin de facilitar su utilización:

- Definición y alcance del pliego

- Condición y normativa a aplicar

- Condiciones técnicas

  - Condiciones de trabajo y seguridad de salud laboral

Para la ejecución de este documento se va a regir por la norma UNE 157001:2014 “Criterios Generales para la Elaboración de Proyectos” [77], Real Decreto 488/1997, de 14 de abril, sobre disposiciones mínimas de seguridad y salud relativas al trabajo con equipos” [78] y ley 31/1995, de 8 de noviembre “Prevención de Riesgos Laborales” [79].

### **9.4. Condiciones técnicas**

El tiempo invertido en el trabajo se divide en dos partes, una primera mitad dedicado a la parte práctica, es decir, constructiva e investigadora y otra parte más teórica en la que se ha trabajado con un ordenador.

En las condiciones técnicas se va a regir en función al real decreto y ley escritas ya que se han de cumplir y mantener unas condiciones de seguridad y salud adecuadas.

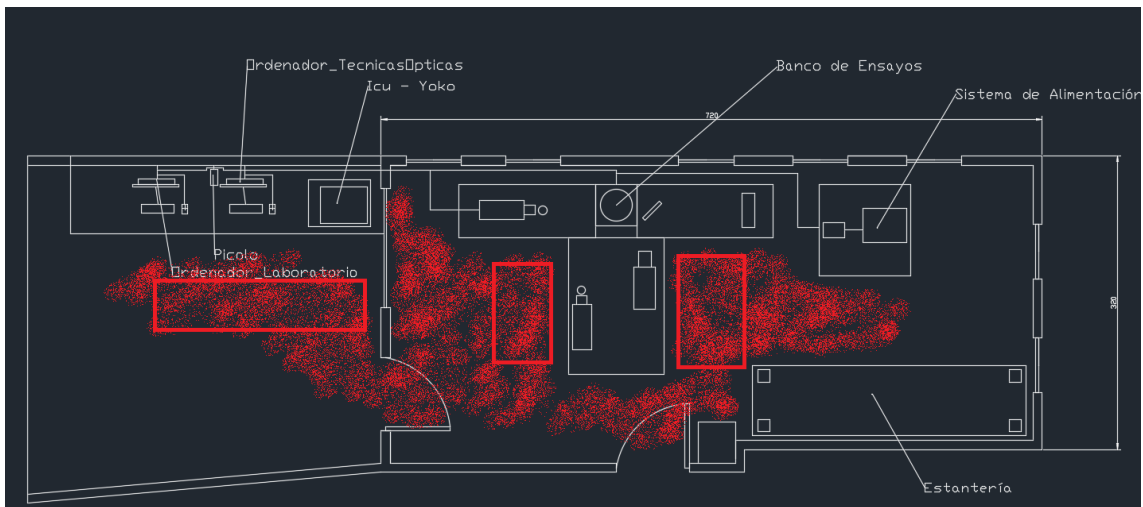
#### **9.4.1. Instalación**

El banco de ensayos que se ha construido está ubicado en la planta baja del Centro de Motores Térmicos dentro de la universidad Politécnica de Valencia. Se encuentra situado en una esquina, con paredes acristaladas y otra mitad sin ellas. Además, está ventilado por las propias ventanas en imagen 99.

**Localización geográfica y características**

<b>Coordenadas geográficas</b>	39°28'41.98"N - 0°20'18.41"O
<b>Superficie (m<sup>2</sup>)</b>	3 x 7 metros (21 m <sup>2</sup> )
<b>Iluminación</b>	SI
<b>Ventilación</b>	SI
<b>Medidas de seguridad e higiene</b>	SI

9.1. Localización geográfica y características. Fuente: Elaboración propia.



99. Situación de la sala de ensayos donde se puede observar en la parte central el banco de ensayos. El rojo está dibujado la zona por donde se debe pasar y en recuadros rojos son las zonas desde donde se tiene que manipular los objetos, aparatos ópticos y demás equipos eléctricos y electrónicos.

**9.4.2. Condiciones de salud y seguridad laboral**

A continuación, se exponen los diferentes artículos de la ordenanza general de seguridad e higiene en el trabajo que se han de tener en cuenta para la realización del trabajo.

Según se aplica en la Ley 31/1995 [79], de Prevención de Riesgos Laborales: “determina el cuerpo básico de garantías y responsabilidades preciso para establecer un adecuado nivel de protección de la salud de los trabajadores frente a los riesgos derivados de las condiciones de trabajo, en el marco de una política coherente, coordinada y eficaz. Según el artículo 6 de la misma serán las normas reglamentarias las que irán fijando y concretando los aspectos más técnicos de las medidas preventivas. Así, son las normas de desarrollo reglamentario las que deben fijar las medidas mínimas que deben adoptarse para la adecuada protección de los trabajadores. Y aporta: “En el mismo

---

sentido hay que tener en cuenta que en el ámbito de la Unión Europea se han fijado mediante las correspondientes Directivas criterios de carácter general sobre las acciones en materia de seguridad y salud en los centros de trabajo, así como criterios específicos referidos a medidas de protección contra accidentes y situaciones de riesgo. Concretamente, la Directiva 90/270/CEE, de 29 de mayo, establece las disposiciones mínimas de seguridad y de salud relativas al trabajo con equipos que incluyan pantallas de visualización. Mediante el presente Real Decreto se procede a la transposición al Derecho español del contenido de la Directiva 90/270/CEE, antes mencionada.”

### **9.4.3. Obligaciones y derechos de los trabajadores**

#### **9.4.3.1. Artículo 14. Derecho a la protección frente a los riesgos laborales.**

1. Los trabajadores tienen derecho a una protección eficaz en materia de seguridad y salud en el trabajo.

El citado derecho supone la existencia de un correlativo deber del empresario de protección de los trabajadores frente a los riesgos laborales.

Este deber de protección constituye, igualmente, un deber de las Administraciones públicas respecto del personal a su servicio.

2. En cumplimiento del deber de protección, el empresario deberá garantizar la seguridad y la salud de los trabajadores a su servicio en todos los aspectos relacionados con el trabajo. A estos efectos, en el marco de sus responsabilidades, el empresario realizará la prevención de los riesgos laborales mediante la integración de la actividad preventiva en la empresa y la adopción de cuantas medidas sean necesarias para la protección de la seguridad y la salud de los trabajadores, con las especialidades que se recogen en los artículos siguientes en materia de plan de prevención de riesgos laborales, evaluación de riesgos, información, consulta y participación y formación de los trabajadores, actuación en casos de emergencia y de riesgo grave e inminente, vigilancia de la salud, y mediante la constitución de una organización y de los medios necesarios en los términos establecidos en el capítulo IV de esta ley. El empresario desarrollará una acción permanente de seguimiento de la actividad preventiva con el fin de perfeccionar de manera continua las actividades de identificación, evaluación y control de los riesgos que no se hayan podido evitar y los niveles de protección existentes y dispondrá lo necesario para la adaptación de las medidas de prevención



señaladas en el párrafo anterior a las modificaciones que puedan experimentar las circunstancias que incidan en la realización del trabajo.

3. El empresario deberá cumplir las obligaciones establecidas en la normativa sobre prevención de riesgos laborales.

4. Las obligaciones de los trabajadores establecidas en esta Ley, la atribución de funciones en materia de protección y prevención a trabajadores o servicios de la empresa y el recurso al concierto con entidades especializadas para el desarrollo de actividades de prevención complementarán las acciones del empresario, sin que por ello le eximan del cumplimiento de su deber en esta materia, sin perjuicio de las acciones que pueda ejercitar, en su caso, contra cualquier otra persona.

5. El coste de las medidas relativas a la seguridad y la salud en el trabajo no deberá recaer en modo alguno sobre los trabajadores.

**9.4.3.2. Artículo 16. Plan de prevención de riesgos laborales, evaluación de los riesgos y planificación de la actividad preventiva.**

1. La prevención de riesgos laborales deberá integrarse en el sistema general de gestión de la empresa, tanto en el conjunto de sus actividades como en todos los niveles jerárquicos

de ésta, a través de la implantación y aplicación de un plan de prevención de riesgos laborales a que se refiere el párrafo siguiente.

Este plan de prevención de riesgos laborales deberá incluir la estructura organizativa, las responsabilidades, las funciones, las prácticas, los procedimientos, los procesos y los recursos necesarios para realizar la acción de prevención de riesgos en la empresa, en los términos que reglamentariamente se establezcan.

2. Los instrumentos esenciales para la gestión y aplicación del plan de prevención de riesgos, que podrán ser llevados a cabo por fases de forma programada, son la evaluación de riesgos laborales y la planificación de la actividad preventiva a que se refieren los párrafos siguientes:

a) El empresario deberá realizar una evaluación inicial de los riesgos para la seguridad y salud de los trabajadores, teniendo en cuenta, con carácter general, la naturaleza de la actividad, las características de los puestos de trabajo existentes y de los trabajadores que deban desempeñarlos. Igual evaluación deberá hacerse con ocasión de la elección de los equipos de trabajo, de las sustancias o preparados químicos y del acondicionamiento de los lugares de trabajo. La evaluación inicial tendrá en cuenta

---

aquellas otras actuaciones que deban desarrollarse de conformidad con lo dispuesto en la normativa sobre protección de riesgos específicos y actividades de especial peligrosidad. La evaluación será actualizada cuando cambien las condiciones de trabajo y, en todo caso, se someterá a consideración y se revisará, si fuera necesario, con ocasión de los daños para la salud que se hayan producido.

Cuando el resultado de la evaluación lo hiciera necesario, el empresario realizará controles periódicos de las condiciones de trabajo y de la actividad de los trabajadores en la prestación de sus servicios, para detectar situaciones potencialmente peligrosas.

b) Si los resultados de la evaluación prevista en el párrafo a) pusieran de manifiesto situaciones de riesgo, el empresario realizará aquellas actividades preventivas necesarias para eliminar o reducir y controlar tales riesgos. Dichas actividades serán objeto de planificación por el empresario, incluyendo para cada actividad preventiva el plazo para llevarla a cabo, la designación de responsables y los recursos humanos y materiales necesarios para su ejecución.

El empresario deberá asegurarse de la efectiva ejecución de las actividades preventivas incluidas en la planificación, efectuando para ello un seguimiento continuo de la misma. Las actividades de prevención deberán ser modificadas cuando se aprecie por el empresario, como consecuencia de los controles periódicos previstos en el párrafo a) anterior, su inadecuación a los fines de protección requeridos.

2 bis. Las empresas, en atención al número de trabajadores y a la naturaleza y peligrosidad de las actividades realizadas, podrán realizar el plan de prevención de riesgos laborales, la evaluación de riesgos y la planificación de la actividad preventiva de forma simplificada, siempre que ello no suponga una reducción del nivel de protección de la seguridad y salud de los trabajadores y en los términos que reglamentariamente se determinen.

3. Cuando se haya producido un daño para la salud de los trabajadores o cuando, con ocasión de la vigilancia de la salud prevista en el artículo 22, aparezcan indicios de que las medidas de prevención resultan insuficientes, el empresario llevará a cabo una investigación al respecto, a fin de detectar las causas de estos hechos.

#### **9.4.3.3. Artículo 17. Equipos de trabajo y medios de protección.**

1. El empresario adoptará las medidas necesarias con el fin de que los equipos de trabajo sean adecuados para el trabajo que deba realizarse y convenientemente adaptados a tal efecto, de forma que garanticen la seguridad y la salud de los trabajadores al utilizarlos.

Cuando la utilización de un equipo de trabajo pueda presentar un riesgo específico para la seguridad y la salud de los trabajadores, el empresario adoptará las medidas necesarias con el fin de que:

- a) La utilización del equipo de trabajo quede reservada a los encargados de dicha utilización.
- b) Los trabajos de reparación, transformación, mantenimiento o conservación sean realizados por los trabajadores específicamente capacitados para ello.

2. El empresario deberá proporcionar a sus trabajadores equipos de protección individual adecuados para el desempeño de sus funciones y velar por el uso efectivo de los mismos cuando, por la naturaleza de los trabajos realizados, sean necesarios.

Los equipos de protección individual deberán utilizarse cuando los riesgos no se puedan evitar o no puedan limitarse suficientemente por medios técnicos de protección colectiva o mediante medidas, métodos o procedimientos de organización del trabajo.

#### **9.4.3.4. Superficies y cubicación**

Los locales de trabajo reunirán las siguientes condiciones mínimas:

- Tres metros de altura desde el piso al techo.
- Dos metros cuadrados de superficie por cada trabajador.
- Diez metros cúbicos para cada trabajador.

Para el cálculo de la superficie y el volumen, no se tendrá en cuenta los espacios ocupados por máquinas, aparatos, instalaciones y materiales.

##### *9.4.3.4.1. Sistema de iluminación de emergencia*

En todos los centros de trabajo, se dispondrá de medios de iluminación de emergencia adecuados a las dimensiones de los locales y al número de trabajadores ocupados simultáneamente, capaces de mantener al menos durante una hora la intensidad de cinco luxes y mediante una fuente de energía que será independiente del sistema normal de iluminación.

##### *9.4.3.4.2. control de ventilación y de temperatura*

---

En los lugares de trabajo y sus anexos se mantendrá, por medios naturales o artificiales, unas condiciones atmosféricas adecuadas, evitando el aire viciado, exceso de calor o de frío, humedad o sequía y los olores desagradables.

En ningún caso, el anhídrido carbónico ambiental, podrá sobrepasar la proporción de 50/10000, y el monóxido de carbono, la de 1/10000.

En los locales de trabajo cerrados, el suministro de aire fresco y limpio por hora y por trabajador, será al menos de 30 metros cúbicos, salvo que se efectúe una renovación total del aire varias veces por hora, no inferior a seis veces para trabajos sedentarios, ni a diez veces para trabajos que exijan un esfuerzo físico superior al normal. En el otro extremo, la circulación de aire en locales cerrados se acondicionará de modo que los trabajadores no estén expuestos a corrientes molestas y que la velocidad del aire no exceda de 15 metros por minuto con temperatura normal, ni de 45 metros por minuto en ambientes extremadamente calurosos.

En los centros de trabajo expuestos a altas y bajas temperaturas, serán evitadas las variaciones bruscas por el medio que se considere más eficaz. Cuando la temperatura sea extremadamente distinta entre los lugares de trabajo, deberán existir locales de paso para que los operarios se adapten gradualmente de unas condiciones a las otras. De acuerdo con todo lo anterior, se fijan como límites de temperatura y humedad en locales y para los distintos trabajos, siempre que el procedimiento de fabricación lo permita,

los siguientes:

- Para trabajos sedentarios: de 17 a 22 °C.
- Para trabajos ordinarios: de 15 a 18 °C.
- Para trabajos que exija acusado esfuerzo muscular: de 12 a 15 °C.

A pesar de estas limitaciones, todos los trabajadores estarán debidamente protegidos contra las irradiaciones directas y excesivas de calor. La humedad relativa de la atmósfera oscilará del 40 al 60 %, salvo en instalaciones que haya peligro de generarse electricidad estática, en cuyo caso este valor se deberá limitar necesariamente por debajo del 50 %.

En aquellos trabajos, en los que por exigencias del proceso los locales están sometidos a un calor o frío extremo, se eliminará la permanencia de los operarios estableciendo, en cada caso, los turnos adecuados.

#### **9.4.3.5. Protección contra contactos en equipos eléctricos**

En las instalaciones y equipos eléctricos, para la protección de las personas contra los contactos con partes habitualmente en tensión, se adoptarán alguna de las siguientes prevenciones:

Se alejarán las partes activas de la instalación a distancia suficiente del lugar donde las personas habitualmente se encuentran o circulan, para evitar un contacto fortuito o por la manipulación de objetos conductores, cuando \_estos puedan ser utilizados cerca de estas partes activas de la instalación.

Se recubrirán las partes activas con el aislamiento apropiado, que permita conservar indefinidamente las propiedades del conductor y que limiten la corriente de contacto a un valor inocuo para las personas.

Se interpondrán obstáculos que impidan todo contacto accidental con las partes activas de la instalación. Los obstáculos de protección deben estar fijados en forma segura y ser capaces de resistir los esfuerzos mecánicos usuales. Para la protección contra los riesgos de contacto con las masas de las instalaciones que puedan quedar accidentalmente con tensión, se adoptarán, en corriente alterna uno o varios de los siguientes dispositivos de seguridad:

Puesta a tierra de las masas. Las masas deben estar unidas eléctricamente a una toma de tierra o a un conjunto de tomas de tierra interconectadas, que tengan una resistencia apropiada. Las instalaciones, tanto con neutro aislado como con neutro unido a tierra, deben estar permanentemente controladas por un dispositivo que indique automáticamente la existencia de cualquier defecto de aislamiento, o que separe automáticamente al instalación o parte de la misma, en la que esté el defecto de la fuente de energía de la que alimenta.

- Dispositivos de corte automático o de aviso, sensibles a la corriente de defecto (interruptores diferenciales), o a la tensión de defecto (relés de tierra).
- Unión equipotencial o por superficie aislada de tierra o de las masas (conexiones equipotenciales).
- Separación de los circuitos de utilización de las fuentes de energía, por medio de transformadores o grupos convertidores, manteniendo aislados de tierra todos los conductores del circuito de utilización, incluso el neutro.
- Poner doble aislamiento de los equipos y máquinas eléctricas.

En el caso de que existan en la empresa circuitos alimentados mediante corriente continua, se adoptarán sistemas de protección adecuados para cada caso, similares a los que se acaban de mencionar para la corriente alterna.

#### **9.4.3.6. Recomendaciones sobre materias inflamables**

Con respecto al almacenamiento y a la manipulación de las sustancias inflamables, dado su peligrosidad, estas serán todas las precauciones que se deberán cumplir para evitar cualquier accidente:

1. Se prohíbe el almacenamiento conjunto de materiales que al reaccionar entre sí puedan originar incendios.
2. Sólo podrán almacenarse materiales inflamables en los lugares y con los límites cuantitativos señalados por los reglamentos técnicos vigentes. De esta forma se almacenarán en locales distintos a los de trabajo. Si el local de trabajo es único, se deberán construir recintos aislados. En los puestos de trabajo, sólo se depositará la cantidad estrictamente necesaria para el proceso de fabricación.
3. En los almacenes de materias inflamables, los pisos deberán ser incombustibles y además impermeables, afín de evitar la propagación del posible fuego y evitar escapes hacia sótanos, sumideros o desagües respectivamente.
4. Antes de almacenar sustancias inflamables pulverizadas, se comprobará su enfriamiento.
5. El llenado de los depósitos de líquidos inflamables, se efectuará lentamente y evitando la caída libre desde orificios de la parte superior, para evitar la mezcla de aire con los vapores explosivos. Estos recipientes de líquidos, además se rotularán indicando su contenido y las precauciones necesarias que se deberán tomar para su manipulación.
6. Antes de almacenar envases de productos inflamables, se comprobará su cierre hermético y si han sufrido algún deterioro o rotura, para evitar posibles fugas.
7. El envasado y embalaje de sustancias inflamables se efectuará, siempre que sea posible, fuera de los almacenes de donde procedan, con las precauciones y equipo de protección adecuado a cada caso.

#### **9.4.3.7. Prevención y extinción de incendios**

En los centros de trabajo que ofrezcan peligro de incendios, con o sin explosión, se adoptarán las prevenciones que se indican a continuación, combinando su empleo con la protección general más próxima que puedan prestar los servicios públicos contra incendios:

1. Donde existan conducciones de agua a presión, se instalarán suficientes tomas o bocas de agua a distancia conveniente entre sí y cercanas a los puestos fijos de trabajo y lugares de paso personal, colocando junto a tales tomas las correspondientes mangueras, que tendrán la sección y resistencia adecuadas para soportar la presión.
2. Cuando se carezca normalmente de agua a presión o ésta sea insuficiente, se instalarán depósitos con un volumen suficiente para poder combatir los posibles incendios.
3. En los incendios provocados por líquidos, grasas, pinturas inflamables o polvos orgánicos, solo se deberá emplear agua, y esta deberá estar además muy pulverizada.
4. No se empleará agua para extinguir fuegos en polvos de aluminio o magnesio en presencia de carburo de calcio u otras sustancias que al contacto con el agua produzcan explosiones, gases inflamables o incluso nocivos.
5. En incendios que afecten a instalaciones eléctricas con tensión, se prohibirá el empleo de extintores de espuma química, soda ácida o agua.
6. En la proximidad a los puestos de trabajo con mayor riesgo de incendio, se dispondrán, colocados en sitio visible y accesible fácilmente, extintores portátiles o móviles sobre ruedas, de espuma física o química, mezcla de ambas o polvos secos, anhídrido carbónico o agua, según convenga a la causa determinante del fuego a extinguir que sea más probable que haga su aparición.
7. Cuando se empleen distintos tipos de extintores serán rotulados con carteles indicadores del lugar o clase de incendio en el que deban emplearse. Estos extintores serán revisados periódicamente y cargados según las normas de las casas constructoras inmediatamente después de usarlos.
8. Se instruirá al personal, cuando sea necesario, del peligro que presenta el empleo de tetracloruro de carbono y cloruro de metilo en atmósferas cerradas y de las reacciones químicas peligrosas que puedan producirse en los locales de trabajo entre los líquidos extintores y las materias sobre las que puedan proyectarse.
9. En las dependencias con alto riesgo de incendio, queda terminantemente prohibido fumar o introducir cerillas, mecheros o útiles de ignición. Esta prohibición se indicará con carteles visibles a la entrada y en los espacios libres de las paredes de tales dependencias.
10. Se prohíbe igualmente al personal introducir o emplear útiles de trabajo, no autorizados por la empresa que puedan ocasionar chispas por contacto o proximidad a sustancias inflamables.
11. Es obligatorio el uso de guantes, manoplas, mandiles o trajes ignífugos, y de calzado especial contra incendios, que las empresas facilitarán a los trabajadores para uso individual.

#### 9.4.3.8. Uso de material LED

En el presente trabajo se ha trabajado con instrumental láser con la finalidad de captación de imágenes mediante la técnica óptica DBI. Como ya se ha explicado en el capítulo experimental en el apartado 4.5 se trabaja con un tipo de láser azul cuya frecuencia es de 473 nm. Este tipo de láseres son peligrosos y se debe tener las precauciones siguientes. Primero se va a clasificar el tipo de LED y en función del tipo llevar las siguientes normas de seguridad.

La clasificación de un láser en categorías de riesgo, permite identificar la peligrosidad del mismo y está basada en el Límite de Emisión Accesible (LEA) para el usuario. Dependiendo del LEA el láser obtendrá una clasificación u otra.

El desarrollo de nuevos productos láser, de potencias intermedias, ha dejado obsoleta la antigua clasificación. Las antiguas Clases 1, 2, 3B y 4 permanecen sin cambios, y se añaden las Clases intermedias 1 M, 2M y 3R lo que hace que láseres que antes resultaban ser Clase 3B, ahora pertenezcan a alguna de estas nuevas categorías.

A continuación se expone de forma casi íntegra la nueva clasificación publicada en la norma UNE EN 60825-1/A2 [80] y según está recogida en la Ley [81].

- Clase 2: Láseres que emiten radiación visible en el intervalo de longitudes de onda comprendido entre 400 y 700 nm. La protección ocular se consigue normalmente por las respuestas de aversión, incluido el reflejo palpebral. Esta reacción puede proporcionar la adecuada protección, aunque se usen instrumentos ópticos

Dentro de estos requisitos, y teniendo en cuenta la clase a la que pertenece cada producto láser, los fabricantes están obligados a adoptar una serie de medidas de seguridad relativas al diseño de sus productos. Entre estas medidas está el empleo de carcasas protectoras, paneles con enclavamientos de seguridad, atenuadores del haz, etc.

En las figuras 98 a 100 se describen las precauciones y que medidas llevar así como es de uso obligatoria la anunciación a través de pictogramas de que se está trabajando con material láser.

A la hora de adoptar medidas de control, la norma sugiere una serie de ellas y establece cuál debe ser la jerarquía de las mismas. En primer lugar, hay que tener en cuenta la capacidad del láser para producir daño, que se obtiene de su clasificación.



En segundo lugar, deben controlarse los factores ambientales por medio de actuaciones técnicas, por ejemplo el establecimiento de un sistema de control de llave o un atenuador del haz, o a través de medidas administrativas, como la designación de un Responsable de Seguridad Láser y el establecimiento de zonas de seguridad mediante la DNRO para láseres de Clase 3B y 4. Finalmente, se han de controlar los factores individuales como la protección ocular y el nivel de conocimiento de los trabajadores acerca del potencial riesgo [80].

La utilización de filtros y gafas de protección es imprescindible si existe la posibilidad de una exposición superior a la máxima permitida. Los EPI de protección láser deben cumplir los requisitos mínimos especificados en la UNE EN 207 y su código es la letra L. Los EPI para los trabajos de ajuste láser deben cumplir los requisitos de la norma UNE EN 208 y su código es la letra R. Es importante distinguir entre ellos, ya que las gafas para ajuste láser protegen menos y se emplean con limitación de potencia y tiempo.

Requisitos	Clasificación						
	1	1M	2	2M	3R	3B	4
Cubierta protectora	--	O	O	O	O	O	O
Bloqueo de seguridad	X	X	X	X	+	+	+
Control remoto	--	--	--	--	--	O	O
Control de llave	--	--	--	--	--	O	O
Aviso de emisión	--	--	--	--	O	O	O
Atenuador del haz	--	--	--	--	--	O	O
Localización de controles	--	--	--	--	♣	♣	♣
Óptica de observación	--	▼	▼	▼	▼	▼	▼
Barrido	O	O	O	O	O	O	O
Etiqueta de Clase	T	T	F, T	F, T	F, T	F, T	F, T
Etiqueta de abertura	--	--	--	--	Te	Te	Te
Etiqueta de entrada en servicio	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)
Etiqueta de neutralización del bloqueo	©	©	©	©	©	©	©
Etiqueta de intervalo de $\lambda$	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼
Etiqueta de LED	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲
Manual con instrucciones de seguridad	O	O	O	O	O	O	O
Información de compra y servicio técnico	O	O	O	O	O	O	O
Productos médicos	♠	♠	♠	♠	♠	♠	♠

- O Obligatorio  
 -- No necesario  
 X Necesario para impedir emisión > 3R  
 ♣ Necesario para impedir emisión > LEA Clase 1 ó 2  
 Te Texto especificado requerido  
 ▲ Correcciones de texto necesarias para productos LED  
 ♠ Se aplica la norma CEI 60601-2-22
- + Necesario para impedir emisión > 3B  
 T Texto requerido  
 ▼ La emisión debe ser < LEA de la Clase 1  
 F Figuras normalizadas  
 (\*) Obligatoria y específica para cada Clase  
 ▼ Obligatoria para ciertos intervalos de  $\lambda$   
 © Obligatoria en ocasiones según la Clase

100. Requisitos específicos a utilizar sobre el tipo de láser LED. En recuadro rojo esta recogida la información sobre el tipo de láser a usar. Fuente: [80].

Marcado de gafas de protección					
Láser Nd:YAG- UNE EN 207/A1: 2003					
	1060	DI	L7	X	
	↑	↑	↑	↑	
	↑	↑	↑	↑	
λ con protección asegurada	→→→→→	↑	↑	↑	↑
Condición ensayo (continuo, pulsado)	→→→→→	↑	↑	↑	↑
Grado protección	→→→→→	→→→→→	→	↑	↑
Identificación del fabricante	→→→→→	→→→→→	→→→→→	→→→→→	↑

101. expone un ejemplo de marcado de gafas de protección para un láser de Neodimio: YAG en el infrarrojo, a 1060 nm, que ha pasado las condiciones de ensayo para láser continuo y pulsado. Fuente: [80].



102. Etiqueta de advertencia por uso de Laser Led. Es obligatoria en los productos láser de las clases 2, 2M, 3R, 313 y 4. Fuente: [80].

#### 9.4.3.9. Uso de material óptico

El establecimiento de la normas de seguridad para el uso de material óptico está guardado en la norma UNE-EN ISO/IEC 17025:2017 requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración [82].

---

#### **9.4.4. Obligaciones y derechos de los recursos informáticos**

Para llevar a cabo los cálculos requeridos por el presente proyecto, se hace necesario el uso de recursos informáticos de altas prestaciones. Estos recursos informáticos pueden ser divididos en dos grupos: hardware y software según se recoge en la Ley de Prevención y riesgos laborales [83].

##### **9.4.4.1. Plazo de adaptación de los equipos que incluyan pantallas de visualización.**

Los equipos que incluyan pantallas de visualización puestos a disposición de los trabajadores en la empresa o centro de trabajo con anterioridad a la fecha de entrada en vigor del presente Real Decreto deberán ajustarse a los requisitos establecidos.

##### **9.4.4.2. Vigilancia de la salud**

1. El empresario garantizará el derecho de los trabajadores a una vigilancia adecuada de su salud, teniendo en cuenta en particular los riesgos para la vista y los problemas físicos y de carga mental, el posible efecto añadido o combinado de los mismos, y la eventual

patología acompañante. Tal vigilancia será realizada por personal sanitario competente y según determinen las autoridades sanitarias en las pautas y protocolos que se elaboren, de conformidad con lo dispuesto en el apartado 3 del artículo 37 del Real Decreto 39/1997, de 17 de enero, por el que se aprueba el Reglamento de los servicios de prevención. Dicha vigilancia deberá ofrecerse a los trabajadores en las siguientes ocasiones:

a) Antes de comenzar a trabajar con una pantalla de visualización.  
b) Posteriormente, con una periodicidad ajustada al nivel de riesgo a juicio del médico responsable.

c) Cuando aparezcan trastornos que pudieran deberse a este tipo de trabajo.

2. Cuando los resultados de la vigilancia de la salud a que se refiere el apartado 1 lo hiciese necesario, los trabajadores tendrán derecho a un reconocimiento oftalmológico.

3. El empresario proporcionará gratuitamente a los trabajadores dispositivos correctores especiales para la protección de la vista adecuados al trabajo con el equipo de que se trate, si los resultados de la vigilancia de la salud a que se refieren los apartados

anteriores demuestran su necesidad y no pueden utilizarse dispositivos correctores normales.

9.4.4.2.1. *Equipos y sistemas de computarización*

**a) Observación general.**

La utilización en sí misma del equipo no debe ser una fuente de riesgo para los trabajadores.

**b) Pantalla.**

Los caracteres de la pantalla deberán estar bien definidos y configurados de forma clara, y tener una dimensión suficiente, disponiendo de un espacio adecuado entre los caracteres y los renglones.

La imagen de la pantalla deberá ser estable, sin fenómenos de destellos, centelleos u otras formas de inestabilidad.

El usuario de terminales con pantalla deberá poder ajustar fácilmente la luminosidad y el contraste entre los caracteres y el fondo de la pantalla, y adaptarlos fácilmente a las condiciones del entorno.

La pantalla deberá ser orientable e inclinable a voluntad, con facilidad para adaptarse a las necesidades del usuario.

Podrá utilizarse un pedestal independiente o una mesa regulable para la pantalla.

La pantalla no deberá tener reflejos ni reverberaciones que puedan molestar al usuario.

**c) Teclado.**

El teclado deberá ser inclinable e independiente de la pantalla para permitir que el trabajador adopte una postura cómoda que no provoque cansancio en los brazos o las manos.

Tendrá que haber espacio suficiente delante del teclado para que el usuario pueda apoyar los brazos y las manos.

La superficie del teclado deberá ser mate para evitar los reflejos.

La disposición del teclado y las características de las teclas deberán tender a facilitar su utilización.

Los símbolos de las teclas deberán resaltar suficientemente y ser legibles desde la posición normal de trabajo.

**d) Mesa o superficie de trabajo.**

La mesa o superficie de trabajo deberán ser poco reflectantes, tener dimensiones suficientes y permitir una colocación flexible de la pantalla, del teclado, de los documentos y del material accesorio.

Dadas las exigencias de los cálculos a realizar, se requieren equipos informáticos con gran potencia de cálculo y memoria. Estos son estaciones de trabajo conectadas en red que permiten acceder a ellas de forma remota y trabajar de forma ininterrumpida, sin saturar el terminal de acceso. Estas máquinas requieren de un mantenimiento periódico para asegurar su perfecto funcionamiento de forma ininterrumpida y con un alto rendimiento.

El soporte de los documentos deberá ser estable y regulable y estará colocado de tal modo que se reduzcan al mínimo los movimientos incómodos de la cabeza y los ojos.

El espacio deberá ser suficiente para permitir a los trabajadores una posición cómoda.

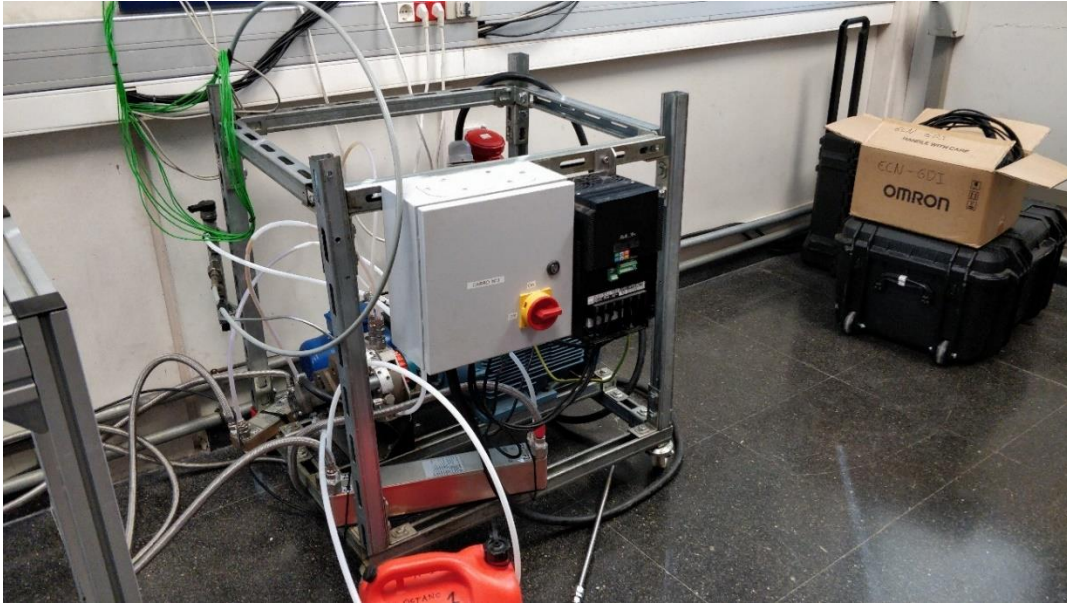
**e) Asiento de trabajo.**

El asiento de trabajo deberá ser estable, proporcionando al usuario libertad de movimiento y procurándole una postura confortable.

#### **9.4.5. Fases de construcción del banco de ensayos**

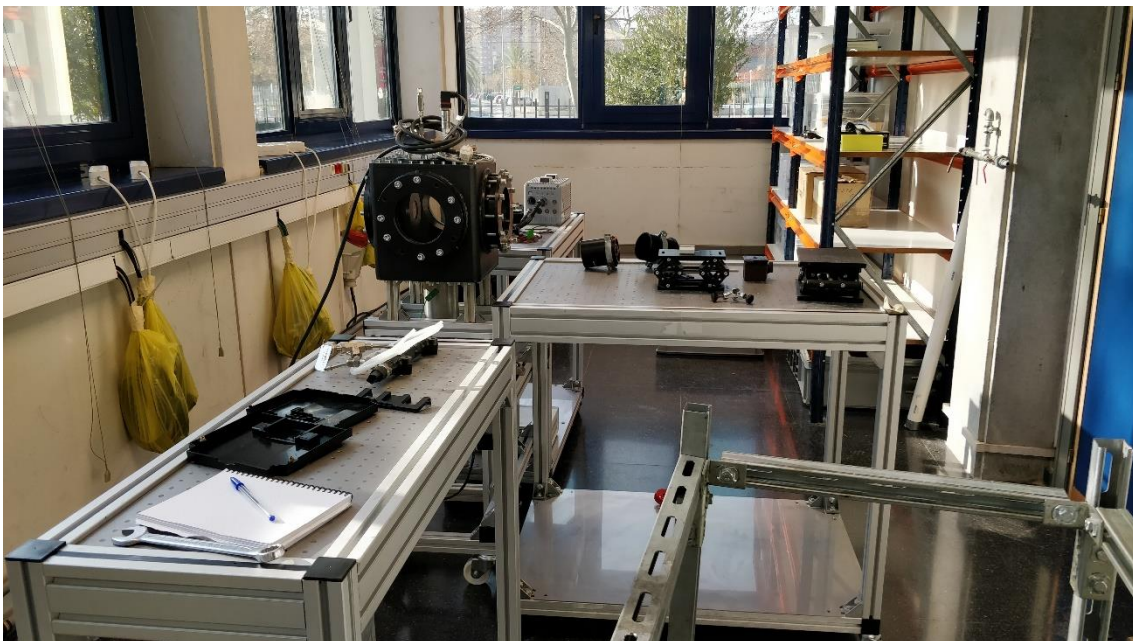
Se van a establecer las fases de construcción y ensamblaje que se han requerido para la ejecución y puesta en marcha. Por último, se acondiciona la sala de ensayos para el equipo óptico

1. Se ejecuta el ensamblaje del equipo de alimentación de combustible en imagen 103. Se conectan así mismo las tomas de agua y lubricación para el sistema de refrigeración. Además, se implantará un depósito de fuel con las correspondientes medidas de seguridad antes comentadas.



103. 1 fase de construcción. Sistema de alimentación de combustible. Fuente: Elaboración propia.

2. Se ensambla la parte central del banco de ensayos en imagen 104. En ella se encuentra la maqueta con el que se experimentará y las mesas ópticas.



104. 2 fase de construcción. Colocacion y acondicionamiento de la maqueta y mesas ópticas.

3. Se construye y se ensambla el sistema de comunicación de las dos fases anteriores en imagen. Esta fase es delicada debido a que se transporta fuel que sale de la bomba a alta presión y temperatura, entonces hay tensiones que debe

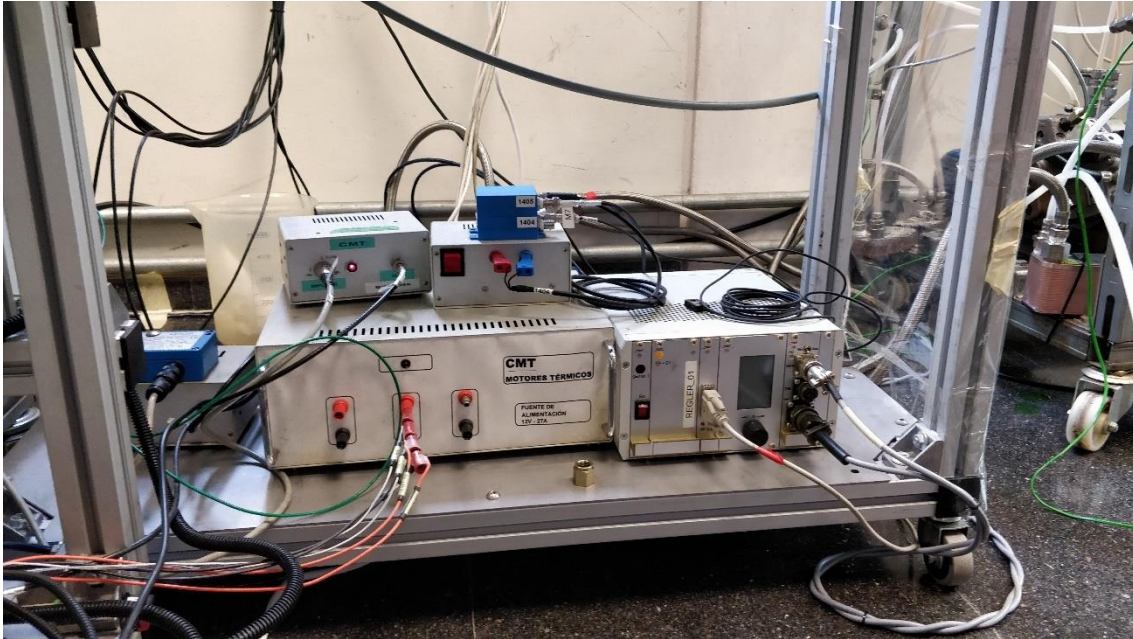
de soportar el sistema de common rail imagen 105. También debido a las piezas de sujeción y agarre entre conductos.



105. 3 fase de construcción. Sistemas common rail y transporte del fuel a la maqueta

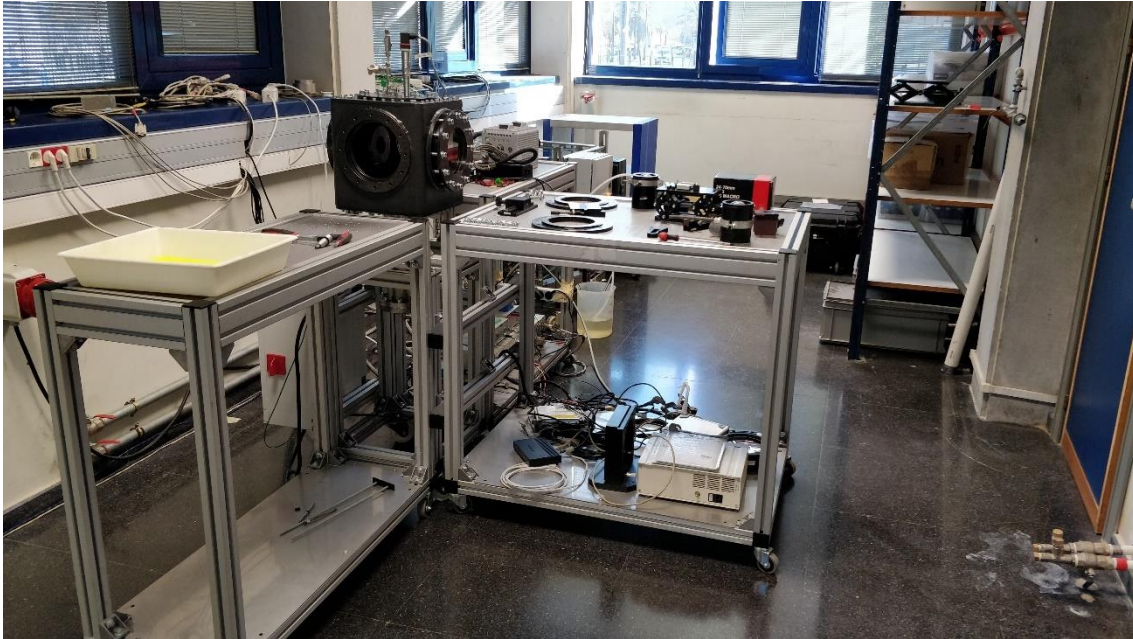
4. Se localiza y se conectan los equipos y aparatos de medición y control de gobierno en imagen 106. Son para los controles de inyección, tiempo de inyección, presiones y temperaturas de la maqueta y del inyector respectivamente.





106. 4 fase de construcción. Se conectan los equipos y aparatos de medición y control de gobierno.

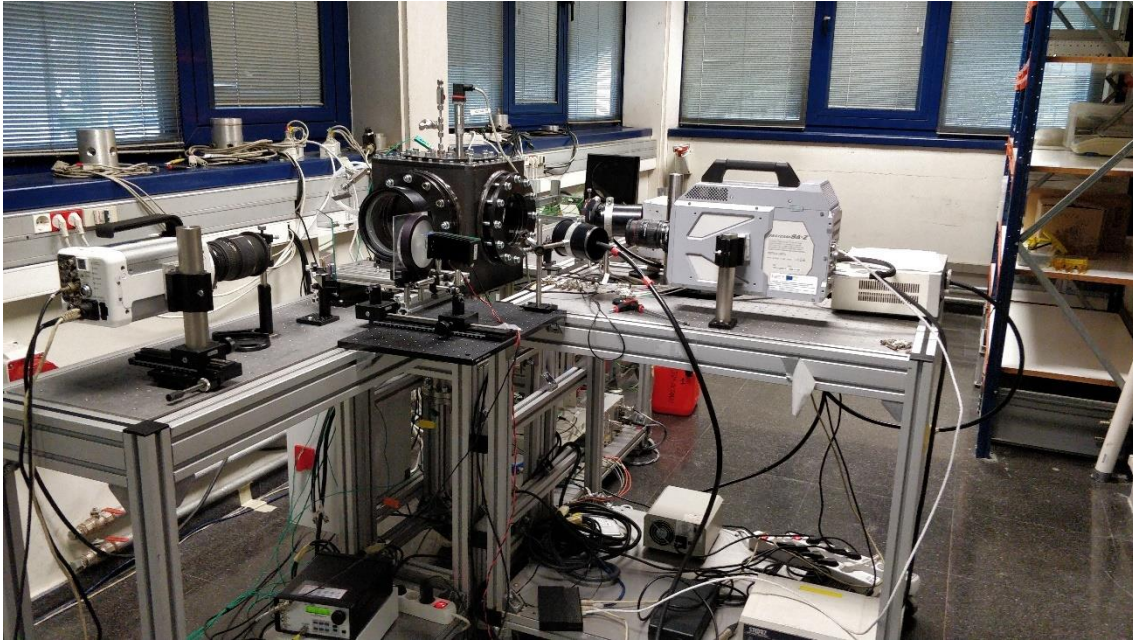
5. Se conectan los equipos de ordenadores que servirán para controlar desde la otra sala, de manera digital, y se mandaran las ordenes de encendido, niveles de presión, temperatura y parón de emergencia de seguridad, tal y como se han establecido anteriormente.
6. Se procede a las conexiones de los ordenadores con los equipos de control y a su vez con la maqueta y common rail en imagen 107. Esta fase vuelve a ser delicada y es necesario concentración para no producir ningún cambio o cortocircuito a la hora de conectar. Para esta fase se ha hecho en el plano 3 del capítulo Anexo C: Planos Descriptivos el esquema de las conexiones para que sea más fácil la comprensión y de a equívocos. También se procede a las conexiones de los sensores que realimentan los datos y se utilizan para el control y toma de decisiones.



*107. 6 fase de construcción. Establecimiento de las conexiones finales*

7. Sistemas ópticos en imagen 108. En esta fase se tiene que realizar después de que resto de fases anteriores se hayan ejecutado. Esto debe de hacerse así porque los sistemas ópticos son delicados y no se pueden dañar, ni ser golpeados ni ensuciados. Para la correspondiente localización de cada componente (cámara, accesorio, filtro...) en el sitio adecuado se tiene en los planos 1 y 2 del capítulo Anexo C: Planos Descriptivos el esquema óptico para una mejor comprensión y no dé lugar a equívocos.
8. Conexión de las tomas de nitrógeno para la maqueta y regulador de temperatura (frio y calor) del inyector

En cada fase se debe de comprobar que este todo bien sujeto o agarrado en su sitio, comprobar que los sistemas y conexiones funcionan y no hay perdidas de fluidos y hacer puestas en marcha de prueba antes de la realización de los ensayos.



*108. 7 fase de construcción. Ensamblaje de todos los equipos ópticos.*

#### **9.4.6. Puestas en marcha**

Las puestas en marcha se deben de hacer y son cruciales para la continuación de la siguiente fase. Se deben de realizar mínimo 4 puestas en marcha, pero se pueden hacer las que sean necesarias si son convenientes.

1. 1º puesta en marcha: en esta puesta en marcha se debe de arrancar el motor y bombas de fuel y aceite de lubricación. el objetivo es que el sistema bombee, fluya y no se producen picos de presión en el aceite. La presión del aceite debe de estar en 5 bar. Se conecta el conducto de entrada al depósito y debe de retornar el fuel al depósito de nuevo por el de salida a más presión ya que ha pasado por el circuito motor-bomba.

Duración: de 5-10 minutos o hasta que se considere que el circuito es equilibrado. Si no es el caso, es que se ha producido o una obstrucción o no hay presión. También se debe de observar que no hay fuga en las tomas de los subsistemas.

2. 2º puesta en marcha: en esta puesta coincide con la finalización de la fase 5. En este caso ya se trabaja desde los ordenadores de la otra sala donde se recibe y se da las ordenes pertinentes.

Antes de empezar con la puesta se debe de corroborar que todos los equipos estén conectados y los sistemas funcionan correctamente.

---

Duración: mínimo 30 minutos. En ese tiempo el circuito de combustible debe de ser estable, no debe de haber fugas, no se tiene que sobrepasar los límites de presión, no tiene que sobrecalentarse el sistema de alimentación. Se debe de revisar periódicamente estos hechos.

3. 3º puesta en marcha: esta puesta es especial ya que es del sistema óptico. Se debe de calibrar y situar en el sitio específico las cámaras y resto de componentes. La calibración se debe de completar cuando se vea la cabeza del inyector y en fondo homogéneo en la pantalla del ordenador. Se debe de tener cuidado con el sistema de LED.
4. 4º puesta en marcha: esta es la última puesta en marcha antes de la realización de los ensayos experimentales. Se realiza en la 8 fase de construcción. En esta puesta en marcha se debe lograr que se produzca las inyecciones dentro de la maqueta a la presión y temperatura que se ordena, también se debe de comprobar que los equipos eléctricos funcionan y trabajan en cuanto se mandan las órdenes.

#### **9.4.7. Inventario: Especificaciones de material y equipos**

A través del inventario se facilita al lector comprender cuales son los materiales aparatos y diferentes equipos que van a ser necesarios utilizar para el montaje y ensamblaje del banco de ensayos. Las piezas estarán distribuidas por el complejo y por la sala. El montaje se va a realizar en la propia sala, por tanto, se trata de un tipo de configuración de proceso por proyectos.

- Son proyectos complejos y únicos por su elaboración, se hacen uno o dos como mucho y no de forma continua,
- hay que coordinar inputs de gran tamaño
- Normalmente los inputs son trasladados hasta el lugar donde se elabora el producto.
- La planificación y control incide principalmente sobre las relaciones de precedencia de las tareas, la duración total del proyecto y el coste de los retrasos.
- Personal altamente cualificada y polivalente.

A continuación, se procede al inventario de aparatos y equipos principales. La maquinaria secundaria como son tornillos, tuercas, arandelas y demás otros aparatos se deja libre al constructor en función del requerimiento que sea necesario.

Se van a dividir en:

- Sistema de alimentación
- Sistema de Common Rail
- Banco principal
- Equipos eléctricos y electrónicos
- Sistemas ópticos
- Sistemas informáticos

<b>Sistemas de alimentación</b>		
<b>Nombre</b>	<b>Descripción</b>	<b>Unidades</b>
<b>Bancada</b>	100x100x100 cm. Metal forjado. Con ruedas.	1
<b>Motor-bomba</b>	ABB M2aa 71b Trifasico. 1355 rpm. 0.37 Kw (50 Hz). Incluye deposito aceite a 5 bar.	1
<b>Intercambiadores de calor</b>	de Refrigerante-fuel. Aceite-agua. Funke GPLK 10-10-H-30.	2
<b>Conductos</b>	Plastico. Metal	

9.2. Inventario. Sistema de alimentación. Fuente: Elaboración propia.

<b>Sistema de transporte Common Rail</b>		
<b>Nombre</b>	<b>Descripción</b>	<b>Unidades</b>
<b>Common rail</b>	senior dw12bted4 1570.L3 9656917280. Incluye sensor de flujo de fuel. 6 entradas/salidas	2
<b>Conducto de fuel</b>	Conducto de transporte de fuel. 1 metro. Plástico reforzado	1
<b>Porta inyector</b>	Mecanizado. Con refrigeración incluida	1

<b>inyector</b>	Solenoide. 8 agujeros. 200 bar. Electrónico. Hierro forjado	2
<b>bulón</b>	Sujeccion del portainyector con el inyector. Forjado y mecanizado. CMT. Acero inoxidable.	1
<b>Válvula de presión</b>	LOK R34 Green. Libera a 300 bar. Acero.	2
<b>Termorregulador de líquido refrigerante – agua ATR</b>	Urmojator. Control PID de temperatura. 40 – 450 kW de refrigeración y 3 – 30kW de calefacción. Acero inoxidable. blanco	1

9.3. Inventario. Sistema de transporte Common Rail. Fuente: elaboración propia

<b>Banco principal</b>		
<b>Nombre</b>	<b>Descripción</b>	<b>Unidades</b>
<b>Maqueta</b>	480 x 480 mm. Acero oxidable AISI 1020 forjado. Negro. Tratamiento inoxidable. 15 bar. Paredes acristaladas. Incluye juntas de presión.	1
<b>Mesas ópticas</b>	1485 x 1035 x 1020mm (1 unid). 585 x 1485 x 1020 mm (2 unid.) incluye ruedas. Tablero perforado para agarres ópticos.	3
<b>Válvula de presión antirretorno</b>	LOK R34 yellow. Libera a 10 bar. Acero.	1
<b>Termómetro</b>	para enroscar Con transmisor integrado Modelo TFT35	1
<b>Resistencia de calor</b>	Tipo espiral. Laton.	1

9.4. Inventario. Banco de pruebas principal

<b>Sistemas de equipos eléctrico y electronicos</b>		
<b>Nombre</b>	<b>Descripción</b>	<b>Unidades</b>
<b>Amplificador de presión de contrapresión</b>	Caja metálica. Centro de motores Térmicos.	1
<b>Amplificador de presión del common rail</b>	Caja metálica azul. Centro de motores Térmicos.	1
<b>Fuente de alimentación ECU</b>	Caja metálica. Centro de motores Térmicos.	1
<b>Fuente de pinza amperimétrica</b>	Caja metálica azul. Centro de motores Térmicos.	1
<b>Pinza amperimétrica</b>	Caja metálica. Centro de motores Térmicos.	1
<b>Regulador de presión de inyección del primer rail o Regler</b>	Caja metálica. Centro de motores Térmicos.	1
<b>Unidad de control electrónico ECU</b>	Caja metálica negro. Centro de motores Térmicos	1
<b>Switch</b>	Caja metálica negro. Centro de motores Térmicos. Incluye cables de internet.	1
<b>Termopares</b>	Cables sensor tipo K. Cobre. -270° a 1372°. - 6.45 a 54.8 mV. Verde.	1
<b>Unidad de Control de Inyección</b>	Caja metálica. Centro de motores Térmicos.	1
<b>Yoko</b>	Caja metálica. Centro de motores Térmicos.	1

*9.5. Inventario. Sistemas de equipos eléctricos y electrónicos*

<b>Sistemas ópticos</b>		
<b>Nombre</b>	<b>Descripción</b>	<b>Unidades</b>
<b>Cámaras de alta velocidad</b>	Photron Fastcam Nova SA-9 - Photron Fastcam SA5 - Photron Fastcam SA-Z	3
<b>Fuentes de luz</b>	Storz xenón nova 300 201340-20. 300 W. Intensidad lumínica gradual. Luz blanca.	3
<b>Fuente Laser LED</b>	Fuente de pulso laser BNC Fuente de generador Laser LED	2
<b>Pulso laser LED</b>	Especial uso y delicado. Mirar 9.4.3.8-9.4.3.5-9.4.3.	1
<b>Soportes de luz</b>	Cilindrico.100 mm diámetro. metálicos	3
<b>Filtro azul LED</b>	Cristal circular	1
<b>Splitter</b>	100 x 100 mm. Cristal	2
<b>Diafragma</b>	Metálico. Parte móvil. circular	1
<b>Espejo parabólico</b>	Especial uso. 200 mm de diámetro. Soporte metálico negro	1
<b>Soporte LED</b>	400 x 400 mm. Aluminio. Negro. Tablero perforado para agarres ópticos.	1
<b>Cables fibra óptica</b>	Cristal. 1 metro	3
<b>Cables coaxiales</b>	Cables tipo <i>thin</i> RG-58 A/U, recubierto PVC.	-
<b>Cable conector BNC</b>	Conector tipo C. de rápida conexión/desconexión.	-
<b>Accesorios</b>	Soportes, apoyos y accesorios para cámaras, filtros, splitters, diafragma	-

*9.6. Inventario. Sistemas ópticos.*



<b>Sistemas informáticos</b>		
<b>Nombre</b>	<b>Descripción</b>	<b>Unidades</b>
<b>Ordenador personal</b>	Dell Inspiron 15 5000 Series. Procesador Intel(R) Core(TM) i7-7500U CPU @ 2.70GHz, 2901 Mhz, 2 procesadores principales, 4 procesadores lógicos. Microsoft Windows 10 Home. Memoria RAM 16 GB. Tarjeta gráfica Radeon graphics	1
<b>Ordenador sobremesa CMT_proyecto 390</b>	HP Workstation PC Torre HP Z2 G4 PC con un procesador Intel® Core™ i5-2430M (2.40GHz), con una memoria RAM de 4 GB, tarjeta gráfica Intel® HD Graphics 3000 y un sistema operativo Windows 10 de 64 bits.	1
<b>Ordenador sobremesa CMT_laboratorio402 - CMT_Tecnicasopticas486</b>	HP Workstation PC Torre HP Z2 G4 PC con un procesador Intel® Core™ i5-2430M (2.40GHz), con una memoria RAM de 4 GB, tarjeta gráfica Intel® HD Graphics 3000 y un sistema operativo Windows 10 de 64 bits.	2

9.7. Inventario. Sistemas informáticos.

### 9.4.8. Organigrama: planificación y organización del proyecto

La organización, planificación y logística es una de las partes principales y fundamentales para sacar adelante un proyecto. Por tanto, el control del proyecto implica que el equipo del proyecto ejecute las tareas y entregas según lo estipulado. Pero pueden surgir alteraciones que no se preveían o externas que provoca asumir la gestión de cambios.

Para el establecimiento del organigrama se ha utilizado la herramienta de diagramas Gantt. Son gráficos de barras que muestran actividades en una escala de tiempo y se usan en la planificación de proyectos medianos.

Como tal, se puede dar datos referentes a las relaciones de tiempo entre las diferentes actividades, al reconocimiento de las actividades ni al manejo de los recursos.

Sin embargo, su presentación es tan simple y fácil de entender que se ha tomado como base de programas de computador más conocidas.

A continuación, se muestra las tablas de planificación, así como el Diagrama Gantt de la planificación y organización del proyecto.

<b>Lectura e investigación</b>			
<b>Actividad</b>	<b>Día inicio</b>	<b>días</b>	<b>Día final</b>
<b>tesis CMT</b>	03/02/2020	18	21/02/2020
<b>Ensayos Combustibles</b>	11/02/2020	3	14/02/2020
<b>Trabajos Tesis Búsquedas internet Artículos</b>	17/03/2020	59	15/05/2020

<b>Estudio teórico del chorro de spray cercano: Matlab y Excel</b>			
<b>Actividad</b>	<b>Día inicio</b>	<b>días</b>	<b>Día final</b>
<b>Aprendizaje Procesamiento de imágenes campo lejano</b>	04/02/2020	20	24/02/2020
<b>Estudio de los combustibles</b>	11/02/2020	16	27/02/2020
<b>Estudio-Ensayos con Inyector TME Campo Cercano</b>	15/04/2020	37	22/05/2020

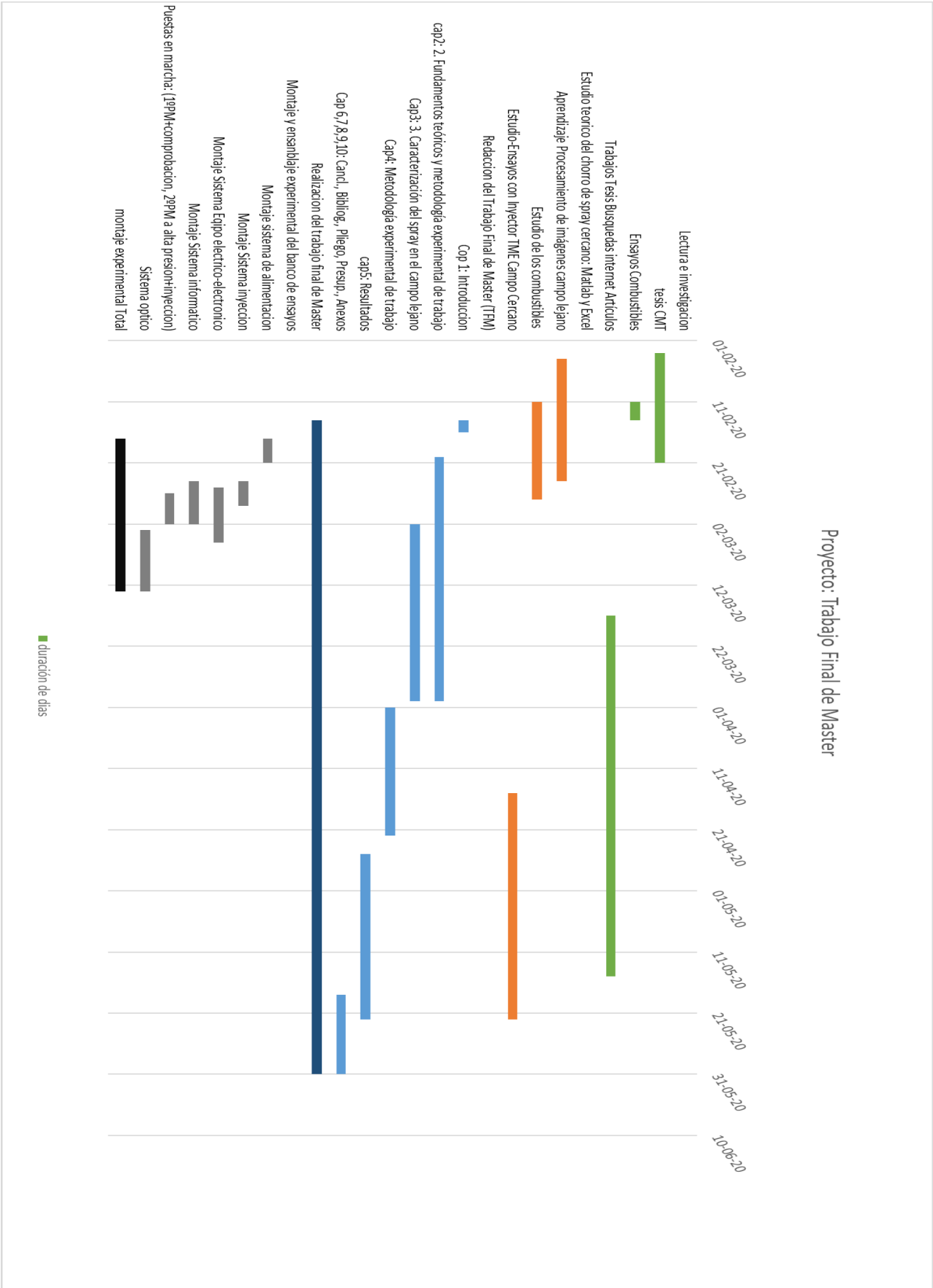
<b>Redacción del Trabajo Final de Master (TFM)</b>			
<b>Actividad</b>	<b>Día inicio</b>	<b>días</b>	<b>Día final</b>
<b>Cap. 1: Introducción</b>	14/02/2020	2	16/02/2020
<b>Cap. 2: 2. Fundamentos teóricos y metodología experimental de trabajo</b>	20/02/2020	40	31/03/2020

<b>Cap. 3: 3. Caracterización del spray en el campo lejano</b>	02/03/2020	29	31/03/2020
<b>Cap. 4: Metodología experimental de trabajo</b>	01/04/2020	21	22/04/2020
<b>Cap. 5: Resultados</b>	25/04/2020	27	22/05/2020
<b>Cap. 6,7,8,9,10: Concl., Bibliog., Pliego, Presup., Anexos</b>	18/05/2020	13	31/05/2020
<b>Realización del trabajo final de Master</b>	14/02/2020	107	31/05/2020

<b>Montaje y ensamblaje experimental del banco de ensayos</b>			
<b>Actividad</b>	<b>Dia inicio</b>	<b>días</b>	<b>Dia final</b>
<b>Montaje sistema de alimentación</b>	17/02/2020	4	21/02/2020
<b>Montaje Sistema inyección</b>	24/02/2020	4	28/02/2020
<b>Montaje Sistema Equipo eléctrico - electrónico</b>	25/02/2020	9	05/03/2020
<b>Montaje Sistema informático</b>	24/02/2020	7	02/03/2020
<b>Puestas en marcha: (1ºPM+comprobacion, 2ºPM a alta presión + inyección)</b>	26/02/2020	5	02/03/2020
<b>Sistema óptico</b>	03/03/2020	10	13/03/2020
<b>montaje experimental Total</b>	17/02/2020	25	13/03/2020

9.8. Diagrama Gantt. Planificación y organización por días del proyecto.

Diagrama Gantt



## **9.5. Condiciones facultativas**

En este presente documento se va a abordar los derechos y obligaciones con contratistas y administración en la fase de ejecución del contrato. Son por tanto garantías de recurso y arbitraje así como las licitaciones en fase de adjudicación del contrato [84]. Los actores que intervienen en este trabajo experimental de investigación son el contratista, la propiedad y la dirección del proyecto.

### **9.5.1. Obligaciones y derechos del contratista**

#### Artículo 1

El personal contratado para llevar a cabo la construcción del puesto, será lo suficientemente cualificado para realizar el mismo de acuerdo con las exigencias del proyecto.

#### Artículo 2

Tiene que tener constancia del cumplimiento con plazos y se hará de acuerdo a las normas ya establecidas. No se dará por finalizada la ejecución hasta que se superen todos los errores o defectos de los elementos a fin de obtener un funcionamiento correcto.

#### Artículo 3

Obligación de disponer de los medios auxiliares para garantizar el correcto desarrollo del trabajo. Los trabajos que se supongan y no se refieran en alguno de los documentos, pero que sean necesarios, correrán por cuenta de la empresa encargada del proyecto, sin aumento del presupuesto.

#### Artículo 4

Obligación de realizar cuantas inspecciones fuesen necesarias. Se debe de notificar la iniciación, realización de pruebas, controles de calidad, finalización o certificaciones de forma previa.

#### Artículo 5

Obligación de reponer todos los materiales o trabajos que no se ajusten a las calidades especificadas en el proyecto.

Artículo 6

Aceptación de las sugerencias del director del proyecto para cumplir con los plazos de trabajo previstos.

### **9.5.2. Obligaciones y facultades de la dirección facultativa**

Artículo 7

La dirección de construcción será responsable del personal contratado a su cargo debiendo velar por la seguridad e higiene de los empleados y por la buena marcha de la ejecución del proyecto.

Artículo 8

Supervisar todos los aspectos del proyecto que faciliten la calidad y seguridad, los cuales se tendrán en cuenta para la realización de los trabajos definidos y/o en los contratos particulares que se lleven a cabo durante la ejecución del mismo.

Artículo 9

Cumplimentar con todos los documentos vigentes y certificados de dirección de obligado cumplimiento en el pliego de condiciones.

Artículo 10

Asumir la responsabilidad derivada de ser la máxima autoridad técnica.

## **9.6. Condiciones económicas**

Artículo 1

Todos los materiales reunirán las condiciones y características necesarias, así como las condiciones técnicas que a tal fin estén establecidas por los organismos competentes de la materia que se trata. Los elementos básicos del se corresponderán con la marca y tipos dictados y aprobados por la dirección técnica.

#### Artículo 2

La dirección técnica tiene la obligación de revisar todos los materiales usados en la ejecución del proyecto, así como de realizar el control de calidad de los mismos una vez recibidos. Por lo tanto, debe ser el ejecutor quién, a la hora de elegir, cuide de que estos sean de la calidad especificada para evitar la posible reclamación por parte de la dirección técnica.

#### Artículo 3

No obstante, para la adquisición de los materiales y aparatos, las facultades que en estos trabajos por administración delegada se reserva el propietario para la adquisición de los materiales y aparatos, si al constructor se le autoriza para gestionarlos y adquirirlos, deberá presentar al propietario, o en su representación al arquitecto director, los precios y las muestras de los materiales y aparatos ofrecidos, necesitando su previa aprobación antes de adquirirlos.

#### Artículo 4

Cuando durante la ejecución de las obras ocupe el contratista, con la necesaria y previa autorización del propietario, edificios o haga uso de materiales o útiles pertenecientes al mismo, tendrá obligación de repararlos y conservarlos para hacer entrega de ellos a la terminación del contrato, en perfecto estado de conservación, reponiendo los que se hubiesen inutilizado, sin derecho a indemnización por esta reposición ni por las mejoras hechas en los edificios, propiedades o materiales que haya utilizado.

#### Artículo 5

Los posibles cambios de componentes, en cuanto a modelos y marcas por parte del fabricante se deberán solicitar a la dirección técnica. De no efectuarse así las responsabilidades recaerán sobre el instalador.

### **9.7. Condiciones legales**

En el presente documento se fijan las condiciones de tipo legal que ha de cumplir el contratista y el tipo de contrato y de adjudicación que han de regir.

### **9.7.1. Contratista**

Se especifica la categoría y características que debe reunir el Contratista. Por ejemplo, si la obra es por encargo de la Administración Pública, la categoría del Contratista viene definida en la Ley de Contratos del Estado. Para este trabajo el contratista proviene de como entidad universitaria al ser estudiante y es contratado con la categoría de investigador definida en la Ley de Contratos del Estado.

### **9.7.2. Contrato**

Se pueden definir varios tipos de contrato. El contrato de este trabajo es por administración Universitaria y como empleado de una empresa como es el Centro de Motores Térmicos.

Alejandro Ortega Arribas, Valencia a 31 de mayo de 2020.



Documento III

# **Presupuesto**



## Capítulo 10

---

# 10. Presupuesto

---

### 10.1. Generalidades

En el presente documento se va a cuantificar el precio de los recursos empleados para la realización de este proyecto y posterior Trabajo Final de Máster. Para ello, se va a computar las horas empleadas por cada una de las personas que han contribuido al mismo. También se tiene en cuenta el coste de los recursos y materiales que se han empleado en el proyecto, así como el coste de los sistemas y equipos informáticos.

Al tratarse de un estudio vinculado a la empresa Centro de Motores Térmicos, aunque este esté subvencionado por la universidad Politécnica de Valencia y por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades – Gobierno de España, se aplicarán los precios de mercado establecidos.

La unidad utilizada como modo de cuantificar el esfuerzo invertido por el personal implicado es la hora de trabajo. La unidad monetaria asociada es €/h de trabajo [85][86][87].

## 10.2. Recursos y personal

A continuación, se indica el número de empleados que se ha hecho cargo del proyecto, con una breve descripción del mismo, así como del Trabajo Final de Master.

Número de empleados	Nombre del cargo	descripción
1	Ingeniero Master	Ejecutor del proyector, Autor del Trabajo Final de Master
1	Ingeniero Doctor	Proyectista y Ejecutor del proyecto
1	Catedrático, Ingeniero Jefe	Tutor del proyecto
2	Ingenieros mecánicos, jefes de sección, especialista	Ayudantes de obra
1	Tornero	Especialista en fabricación y manipulación de piezas

10.1.Presupuesto: Empleados y personal del proyecto y Trabajo Final de Master. Fuente: Elaboración propia.

## 10.3. Investigación recogida de información y análisis de la misma

Se incluye aquí toda la búsqueda teórica que se ha realizado

- Previamente al proyecto <sup>(1)</sup>
- Durante el proyecto y trabajo del mismo <sup>(2)</sup>
- Teoría e investigación de estudio durante el mismo <sup>(3)</sup>

Descripción	Unidades (ítems-h)	Coste unitario (€/h)	Importe (€)
Ingeniero Investigador	100 <sup>(1)</sup>	8,25	825
	21 <sup>(2)</sup>	8,25	173,38
	150 <sup>(3)</sup>	8,25	1.237,5
<b>Subtotal</b>			<b>2.235,88</b>

10.2. Presupuesto: Investigación y análisis. Fuente: Elaboración propia.

### 10.3.1. Seguimiento del trabajo

Durante el desarrollo del proyecto se han llevado a cabo diversas reuniones con el tutor del proyecto para proponer mejoras y soluciones a los problemas que han sido encontrados durante la realización del mismo.

Descripción	Unidades (ítems-h)	Coste unitario (€/h)	Importe (€)
Ingeniero master	15	3	45
Ingeniero Doctor	10	5	50
Tutor proyecto	2	8	16
<b>Subtotal</b>			<b>111</b>

10.3. Presupuesto. Seguimiento del trabajo. Fuente: Elaboración propia.

### 10.4. Coste de la mano de obra: Montaje y Puesta en Marcha

En este apartado se detalla el coste del personal implicado en el desarrollo del proyecto y trabajo.

Descripción	Unidades (ítems-h)	Coste unitario (€/h)	Importe (€)
Ingeniero master	150	3	450
Ingeniero Doctor	150	5	750
1º Especialista	75	7	525
2º Especialista	50	7	350
Tornero	16	7	112
<b>Subtotal</b>			<b>2.487</b>

10.4. Presupuesto: Coste de mano de obra. Fuente: Elaboración propia.

## 10.5. Equipos y materiales

Unidad	Descripción	Unidades (ítems-h)	Coste unitario (€/h)	Importe (€)
<b>Sistema de alimentación</b>				
	Bancada	1	-	142
	Motor-bomba	1	-	167,34
	Intercambiadores de calor	2	-	1.462
m	Conductos	-	1.8	
l	Fuel	-	1.25	-
<b>Sistema de transporte Common Rail</b>				
	Common rail	1	-	225
m	Conducto de fuel inyector	1	2	
		2	-	175
	Válvula de presión	1	-	167
	Termorregulador de líquido refrigerante – agua ATR	1	-	681,27
<b>Banco principal</b>				
	Maqueta	1	-	3.800
	Mesas ópticas	3	1357	4.071
	Válvula de presión antirretorno	1	-	207,36
	Termómetro	1	-	167,25
<b>Sistemas de equipos eléctrico y electrónicos</b>				
	Amplificador de presión de contrapresión	1	-	115
	Amplificador de presión del common rail	1	-	115
	Fuente de pinza amperimétrica	1	-	13,42
	Pinza amperimétrica	1	-	40,27
	Unidad de control electrónico ECU	1	-	867,58
	Switch	1	-	22,39

	Termopares	6	29.19	175,14
	Unidad de Control de Inyección	1	-	825,34
	<b>Sistemas ópticos</b>			
	Cámaras ópticas	3	50.000/30.000	80.000
	Fuentes de luz	3	1.750	5.250
	Fuente Laser LED	1	-	689,97
	Accesorios	12	-	67
m	Cables/conectores		7,3	-
	<b>Sistemas informáticos</b>			
	Ordenadores	4	1565	5.845
	<b>Otros</b>			
	Accesorios, piezas, tornillería		-	65.000
	<b>Subtotal</b>			<b>170.291,33</b>

10.5. Presupuesto. Equipos y materiales. Fuente: Elaboración propia.

## 10.6. Diseño CAD Posprocesado de imágenes

Para de postprocesado de imágenes, de cada uno de los casos que se estudian con los métodos adecuados que permitan obtener de forma correcta resultados eficaces. Es preciso monitorizar los cálculos para localizar y evaluar los parámetros de una manera eficiente.

Se han utilizado códigos en Matlab y Excel que permiten la obtención de resultados graficados.

Descripción	Unidades (ítems-h)	Coste unitario (€/h)	Importe (€)
<b>Ingeniero Master Implementación diseño</b>	20	12,39	247,8
<b>Ingeniero Master Implementación análisis Matlab</b>	130	15,38	1999,4
<b>Subtotal</b>			<b>2247,2</b>

10.6. Presupuesto. Diseño y postprocesado. Fuente: Elaboración propia.

## 10.7. Redacción Trabajo Final de Master

Descripción	Unidades (ítems-h)	Coste unitario (€/h)	Importe (€)
Ingeniero Master	168,75	3	506,25
<b>Subtotal</b>			<b>506,25</b>

*10.7. Presupuesto. Redacción Trabajo Final de Master. Fuente: Elaboración propia.*

## 10.8. Presupuesto de ejecución por contrata

▪ Presupuesto de ejecución material .....	177.878,66 €
▪ Gastos Geneales (8%).....	14.230,30
▪ Total Parcial.....	192.108,95 €
▪ I.V.A (11%).....	21.130,98 €
▪ TOTAL PRES. DE EJECUCIÓN POR CONTRATA.....	213.240,83 €

*Asciende el Presupuesto de Ejecución por Contrata, a la cantidad de **213.240,83 €***



## 10.9. Presupuesto total

- Presupuesto de ejecución por contrata..... 213.240,83 €
- Dirección de calidad (1 %).....2.132,70 €
- Presupuesto Total..... 215.373,53 €

*Asciende el Presupuesto Total, a la cantidad de **215.373,53€***

<b>Presupuesto Total</b>	<b>215.373,53 €</b>
--------------------------	---------------------

Valencia, 31 de mayo de 2020

Alejandro Ortega Arribas



## Documento III

# **Anexos**



## Capítulo 11

---

# 11. Anexo: Planos Descriptivos

---

### **Anexo A: Problemas de montaje del banco de ensayos**

En el montaje y ensamblaje del banco de ensayos se tuvo los siguientes dos problemas principales:

- Fugas de refrigerante en los conductos y maqueta.
- Grietas en la soldadura de la parte inferior de la maqueta, donde está apoyado la resistencia como se puede ver en la imagen 109 izquierda.

Como se ve en la imagen 109 derecha, se observa una grieta o fisura señalado en círculo rojo. La explicación de la formación de la grieta es principalmente por la soldadura, son regiones que han sido sometidos a tratamientos térmicos con posterior enfriado, queda tensión residual que si no se eliminan correctamente provoca un cambio en la estructura atómica. Esa desestructura en la región atómica del metal crea el origen de la fisura que se va propagando a lo largo de la soldadura hasta la superficie. Se observa por otra parte, que la grieta tiene un ángulo de 45° debido a las tensiones tangenciales a las que se a visto sometida o debido a la forma de la soldadura.



109. Problemas de montaje. Fuga de aire por presión en la soldadura. A la izquierda se ve la función de la pieza que es apoyar la resistencia, a la derecha en una imagen aumentada se ve la grieta en la soldadura.

Si no se arreglaba el problema podría ocasionar el propagamiento de la grieta y posterior rotura total de pieza, ocasionado un daño más total al banco de ensayos.

Tras la revisión de la pieza y evaluación de la misma como se ve en la imagen 109 izquierda se decide volver a realizar una nueva pasada de soldadura como se ve en la imagen 110.

Se utilizó el tipo de soldadura por arco eléctrico añadiendo estaño como material remanente. Una vez vista revisada y con una evaluación positiva se volvió a colocar en el sitio correspondiente.



110. En las dos imágenes de observa la pieza ya soldada. En la izquierda en el momento posterior de la soldadura. En la derecha la pieza ya soldada.

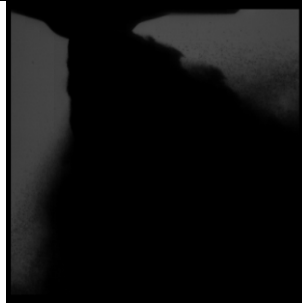




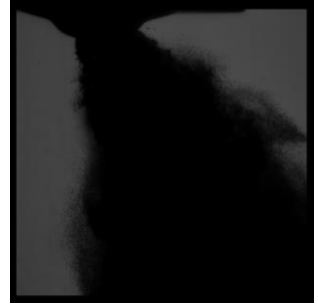
## Anexo B: Imágenes de procesado

Punto de estudio	Tiempo ASOI= 0.3170 microseg	Tiempo ASOI= 0.5000 microseg	Tiempo ASOI= 1.3333 microseg
<p><b>Punto 01:</b> (Pback=3 bar; Pinj=100 bar)</p>			
<p><b>Punto 02:</b> (Pback=3 bar; Pinj=200 bar)</p>			
<p><b>Punto 03:</b> (Pback=3 bar; Pinj=280 bar)</p>			
<p><b>Punto 04:</b> (Pback=6 bar; Pinj=100 bar)</p>			
<p><b>Punto 05:</b> (Pback=6 bar; Pinj=200 bar)</p>			

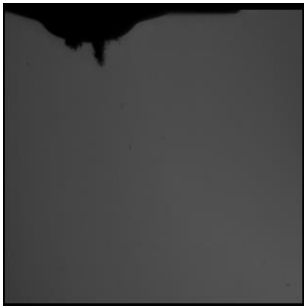
Punto 06:  
(Pback=6  
bar; Pinj=280  
bar)



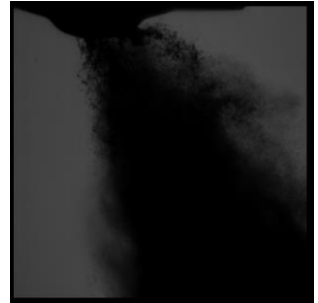
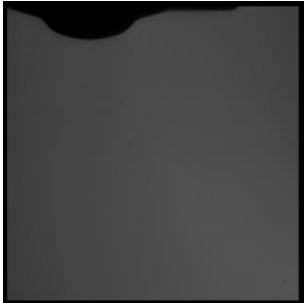
Punto 07:  
(Pback=10  
bar; Pinj=100  
bar)



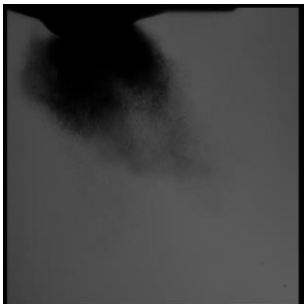
Punto 08:  
(Pback=10  
bar; Pinj=200  
bar)



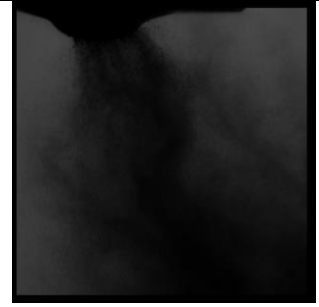
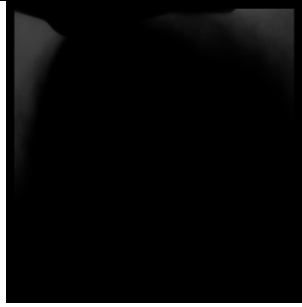
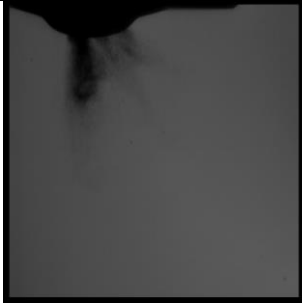
Punto 09:  
(Pback=10  
bar; Pinj=280  
bar)



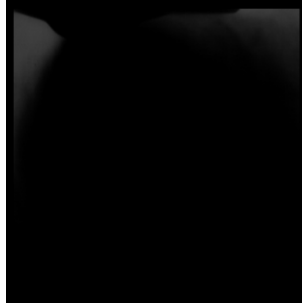
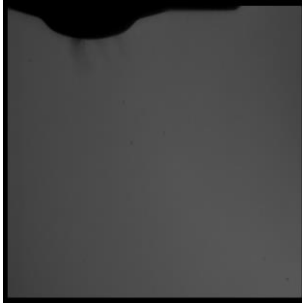
Punto 10:  
(Pback=0.5  
bar; Pinj=100  
bar)



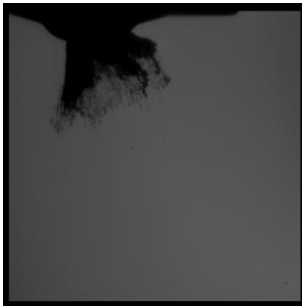
Punto 11:  
(Pback=0.5  
bar; Pinj=200  
bar)



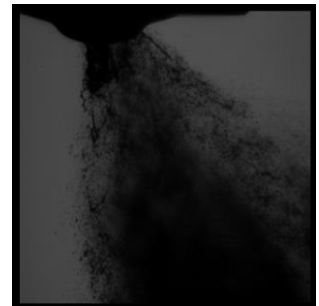
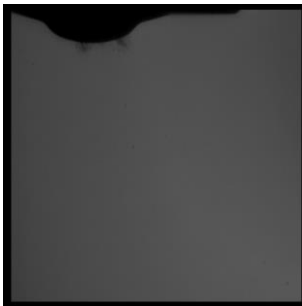
Punto 12:  
(Pback=0.5  
bar; Pinj=280  
bar)



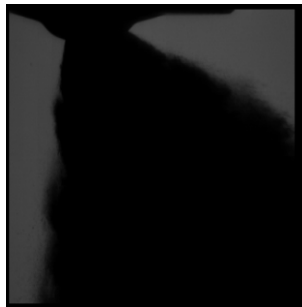
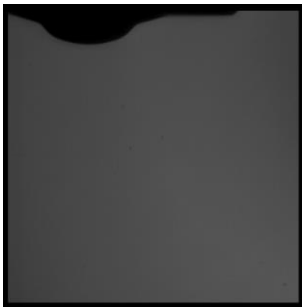
Punto 16:  
(Pback=1  
bar; Pinj=100  
bar)



Punto 17:  
(Pback=1  
bar; Pinj=200  
bar)



Punto 18:  
(Pback=1  
bar; Pinj=280  
bar)



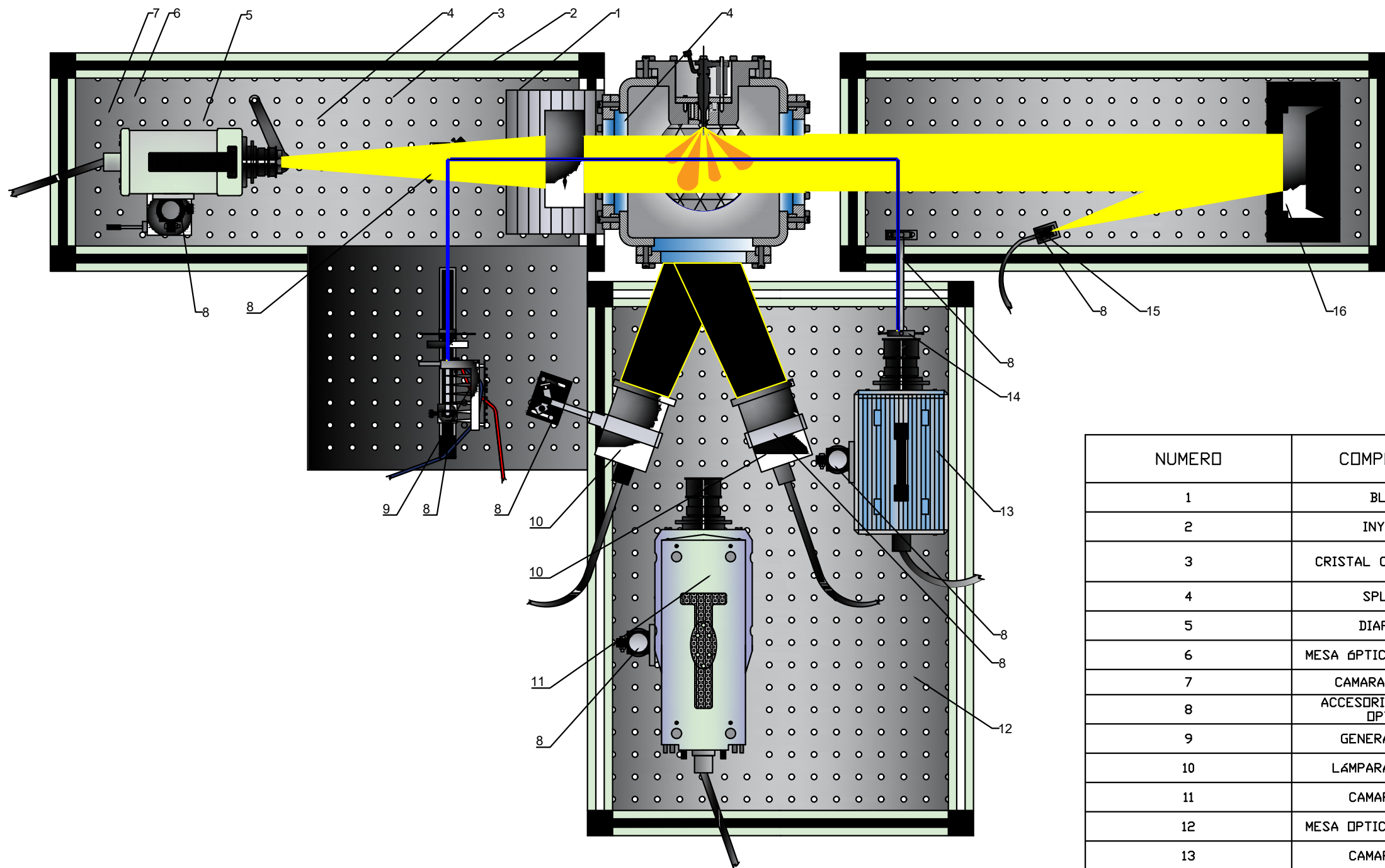
---

111.Imágenes de procesado.



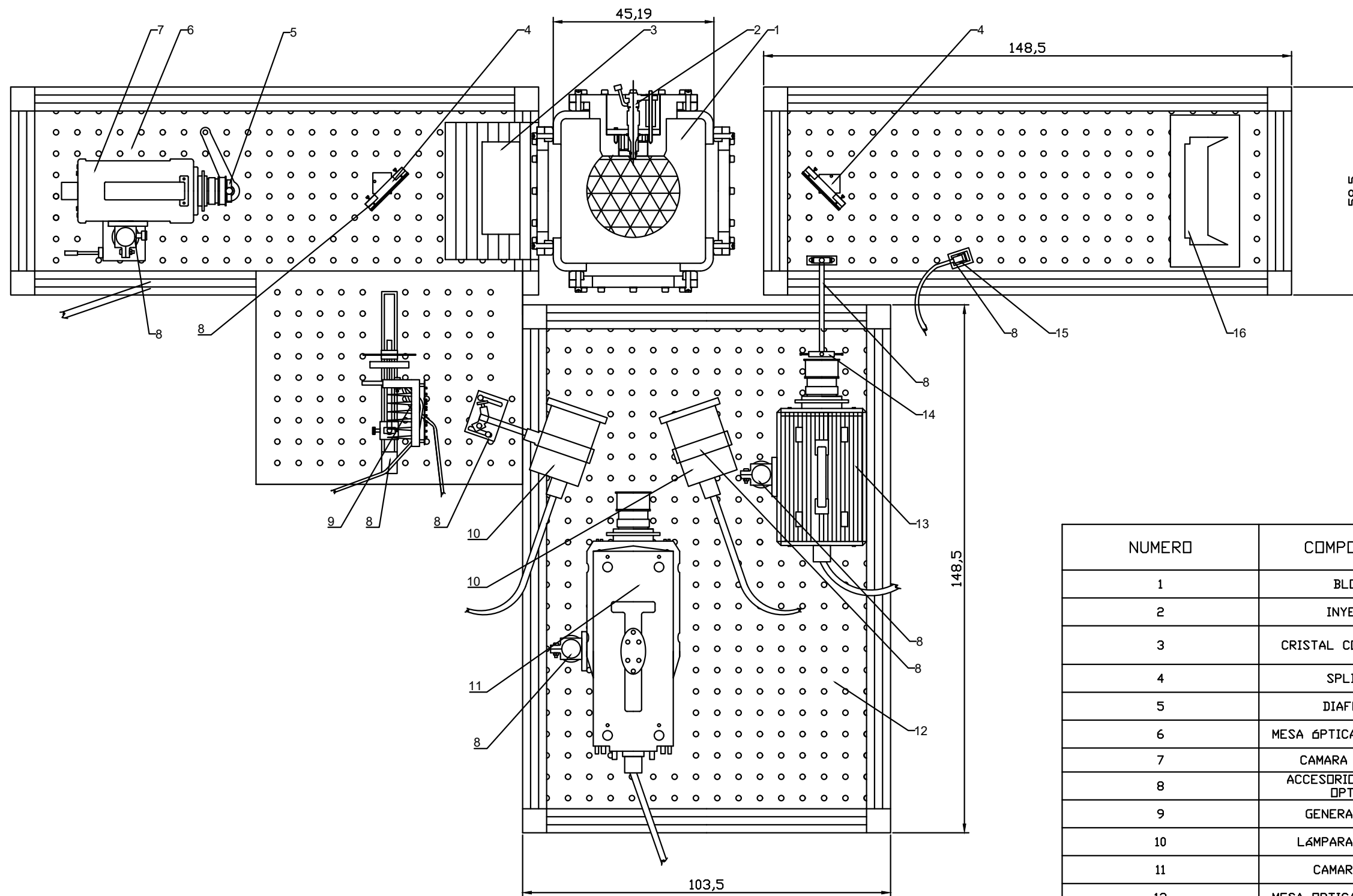
## **Anexo C: Planos Descritivos**





NUMERO	COMPONENTE	UNIDAD/ES
1	BLOQUE	1
2	INECTOR	2
3	CRISTAL CONVERGENTE	1
4	SPLITTER	2
5	DIAFRAGMA	1
6	MESA ÓPTICA (600X300 m)	2
7	CAMARA SA-NOVA	1
8	ACCESORIOS SOPORTE ÓPTICOS	12
9	GENERADOR LED	1
10	LÁMPARAS DE LUZ	2
11	CAMARA SA-5	1
12	MESA OPTICA (900X600 m)	1
13	CAMARA SA-Z	1
14	FILTRO AZUL	1
15	LAMPARA DE LUZ	1
16	ESPEJO PARABOLICO	1

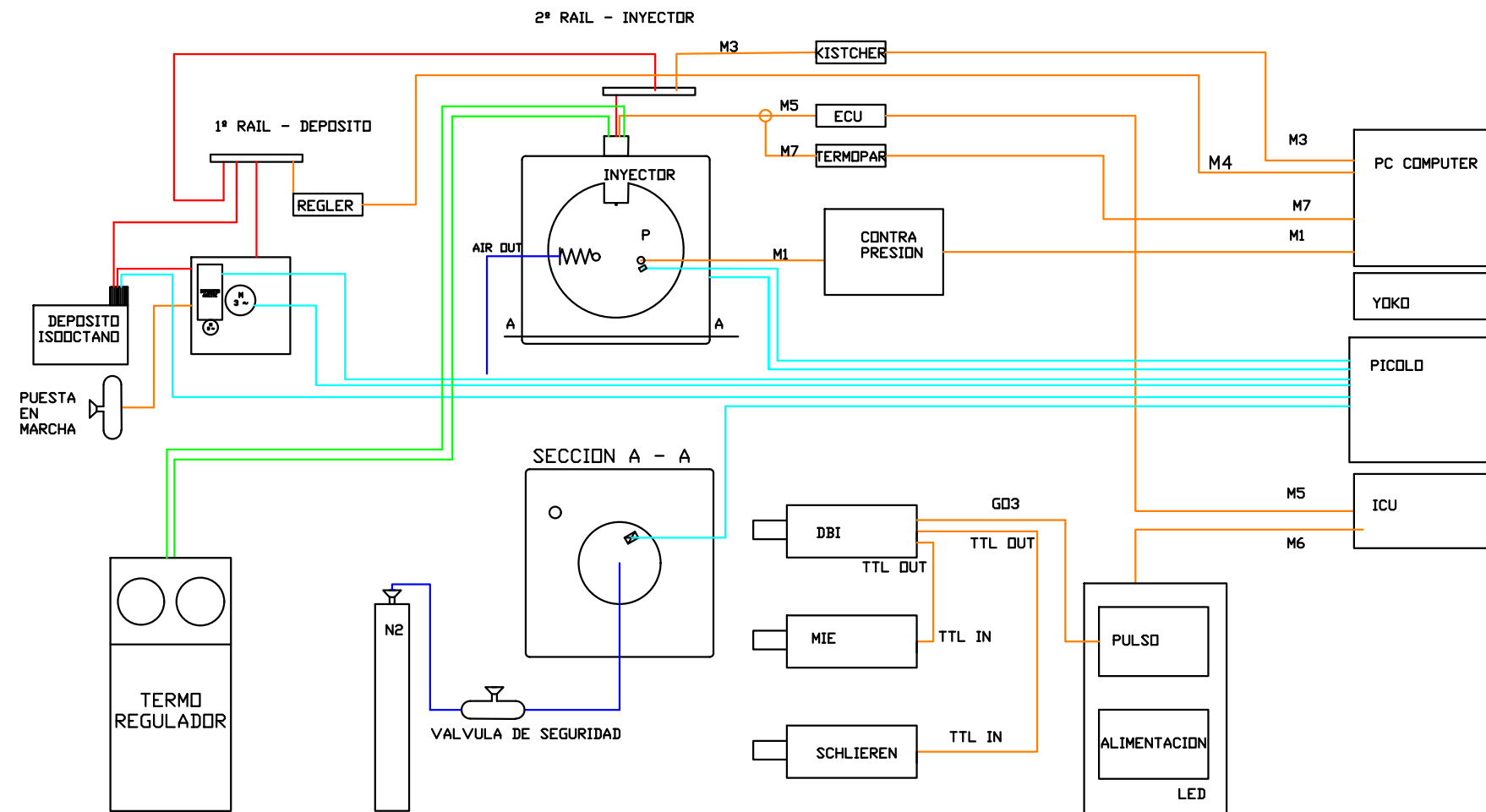
	Tipo de documento: <b>plano de tecnicas opticas</b>	Creado por: <b>Alejandro Ortega Arribas</b>	Fecha: 23/04/2020
	Unidades: milímetros	Aprobado por:	Descripción:
Línea Inyección	Acabado:	Referencia:	Revision:
A3 escala: 1:10000	Material:		Hoja: 1 de 3



NUMERO	COMPONENTE	UNIDAD/ES
1	BLOQUE	1
2	INYECTOR	2
3	CRISTAL CONVERGENTE	1
4	SPLITTER	2
5	DIAFRAGMA	1
6	MESA ÓPTICA (600X300 m)	2
7	CAMARA SA-NOVA	1
8	ACCESORIOS SOPORTE OPTICOS	12
9	GENERADOR LED	1
10	LÁMPARAS DE LUZ	2
11	CAMARA SA-5	1
12	MESA OPTICA (900X600 m)	1
13	CAMARA SA-Z	1
14	FILTRO AZUL	1
15	LAMPARA DE LUZ	1
16	ESPEJO PARABOLICO	1

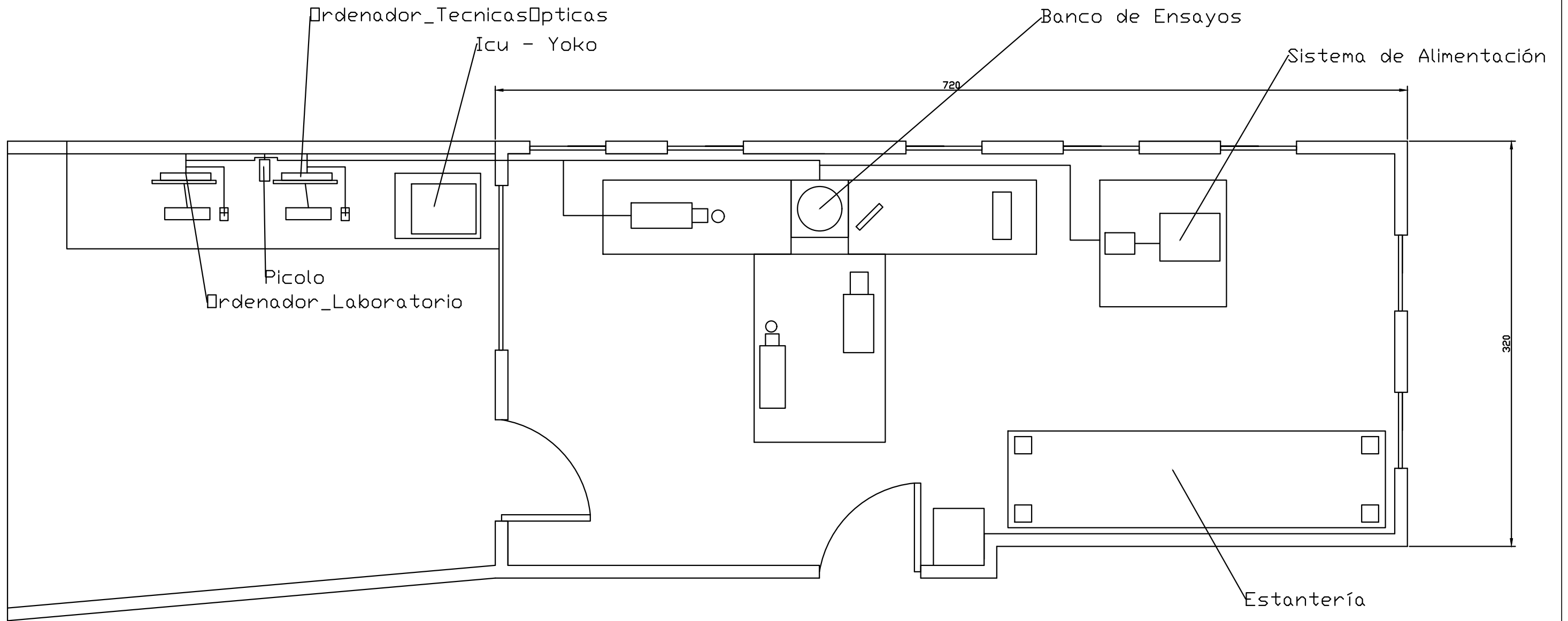
	Tipo de documento: <b>plano de tecnicas opticas</b>	Creado por: <b>Alejandro Ortega Arribas</b>	Fecha: 23/04/2020
	Unidades: milímetros	Aprobado por:	Descripción:
Línea Inyección	Acabado:	Referencia:	Revision:
A3 escala: 1:10000	Material:		Hoja: 2 de 3






ESTADO	COLOR
NEUMATICO	AZUL
ELECTRICO	NARANJA
FUEL	ROJO
HIDRAULICO	VERDE
PICCOLLO	CYAN

	Tipo de documento: <b>Esquema técnico del experimento</b>	Creado por: <b>Alejandro Ortega Arribas</b>	Fecha: 23/04/2020
	Unidades: milímetros	Aprobado por:	Descripción:
Línea Inyección	Acabado:	Referencia:	Revision:
A3 escala:	Material:		Hoja: 3 de 3



	Tipo de documento: <b>plano-esquema planta sala de ensayos</b>	Creado por: <b>Alejandro Ortega Arribas</b>	Fecha: 25/05/2020
	Unidades: milímetros	Aprobado por:	Descripción:
Línea Inyección	Acabado:	Referencia:	Revision:
A3 escala: 1:10000	Material:		Hoja: 4 de 4

## **Anexo D: Cartel representativo**



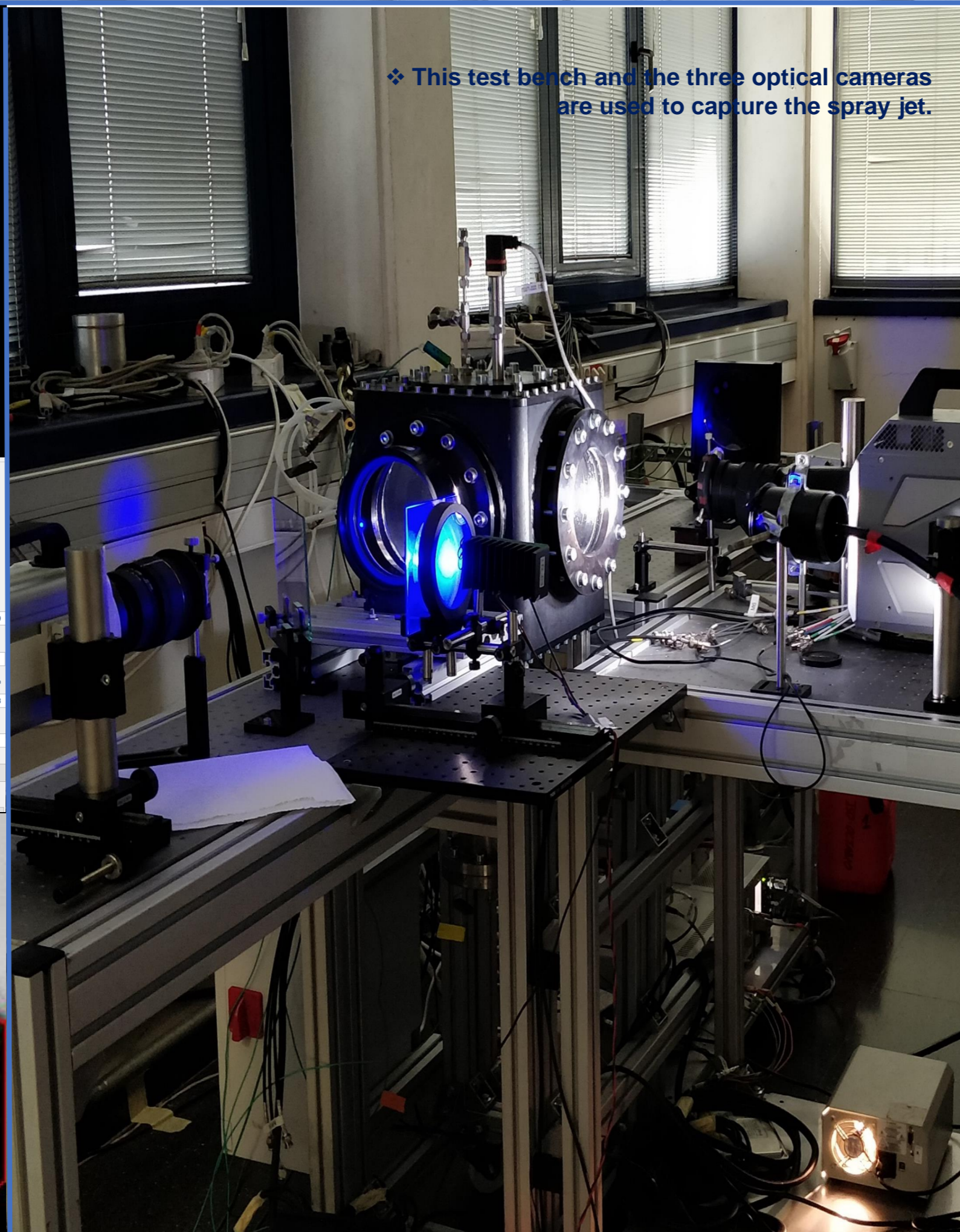
# DIRECT INJECTION TEST BENCH IN GDI ENGINES

## OBJECTIVES INTO NEAR AND FAR FIELD:

- OBSERVE LIQUID AND VAPOR SPRAY
- CONDITIONS FLASH BOILING
- CONDITIONS COLLAPSE

## IMAGING TECHNIQUES

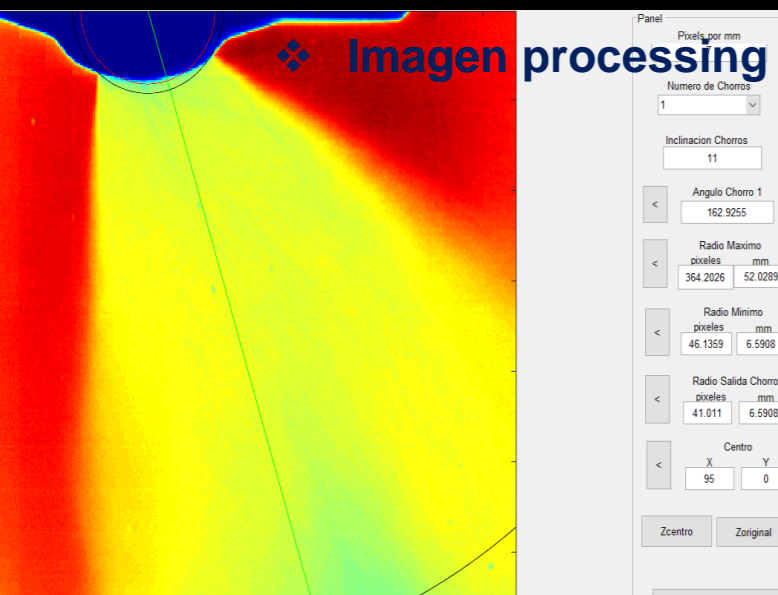
- DBI TECHNIQUE
- SCHLIEREN TECHNIQUE
- MIE TECHNIQUE



❖ This test bench and the three optical cameras are used to capture the spray jet.

## POSTPROCESSED ANALYSIS

- FURTHEST
- SPRAY ANGLE
- VELOCITY
- WIDTH
- OBSERVATION OF SPRAY COLLAPSE AND FLASH BOILING



❖ spray jet morphology

