



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



TRABAJO FINAL DE GRADO DE INGENIERÍA MECÁNICA

ANÁLISIS DEL PROCESO DE INYECCIÓN DE UREA A PARTIR DE TÉCNICAS ÓPTICAS EN CONDICIONES DE ESCAPE DE UN MOTOR

Autor: **Garaulet Belda, Jorge**

Tutora: **Bracho León, Gabriela**

Fecha: **Julio 2019**

Resumen

A raíz de los problemas de contaminación que existen hoy en día, las normativas de emisión de contaminantes cada vez se hacen más restrictivas, lo que conlleva a que se desarrollen nuevos métodos para reducir esas emisiones como, por ejemplo, los sistemas de reducción catalítica selectiva (SCR). Este sistema se centra en reducir la emisión de NO_x mediante reacciones químicas con una solución de urea y, junto a otros sistemas complementarios, permite eliminar la mayor parte de los contaminantes.

Este trabajo se centra en el estudio mediante técnicas ópticas del proceso de inyección de urea a los gases de escape de un motor generados en una instalación que permite simular distintos puntos de funcionamiento.

ÍNDICE

| | |
|---|----|
| Memoria..... | 9 |
| 1. Introducción..... | 11 |
| 1.1. Antecedentes | 11 |
| 1.2. Objetivos | 12 |
| 1.3. Justificación..... | 12 |
| 1.4. Estructura del trabajo | 13 |
| 2. Marco teórico | 15 |
| 2.1. Emisiones de contaminantes | 15 |
| 2.2. Óxidos de nitrógeno (NOx) | 16 |
| 2.3. Normativas de control de emisiones..... | 17 |
| 2.4. Reducción de emisiones en los MEC | 18 |
| 2.5. Sistemas de reducción catalítica selectiva (SCR)..... | 19 |
| 2.6. Componentes del sistema de inyección de urea..... | 21 |
| 2.7. Técnicas ópticas para la visualización microscópica del chorro agua-urea | 22 |
| 3. Instalación para simular las condiciones de escape de un motor..... | 23 |
| 3.1. Componentes de la instalación | 23 |
| 3.2. Elementos de control..... | 26 |
| 3.3. Otros elementos de control | 27 |
| 4. Visualización Óptica | 31 |
| 4.1. Montaje y componentes..... | 31 |
| 4.2. Plan de ensayos | 37 |
| 5. Postratamiento y análisis de resultados..... | 39 |
| 5.1. Procesado de imágenes | 39 |
| 5.1.1. Determinación del tamaño de las gotas | 40 |
| 5.1.2. Determinación de la velocidad de las gotas..... | 41 |
| 5.2. Resultados de Diámetro y Velocidad de las gotas..... | 42 |
| 5.2.1. Efecto de la presión de inyección sobre el diámetro..... | 42 |
| 5.2.2. Efecto de la presión de inyección sobre la velocidad del eje Y | 44 |
| 5.2.3. Efecto de la presión de inyección sobre la velocidad del eje X..... | 46 |
| 5.2.4. Efecto de la temperatura del flujo de aire sobre el diámetro..... | 49 |
| 5.2.5. Efecto de la temperatura del flujo de aire sobre la velocidad | 50 |
| 6. Conclusiones | 55 |
| 6.1. Conclusiones | 55 |

| | |
|---|----|
| 6.2. Trabajos futuros | 56 |
| 7. Bibliografía..... | 57 |
| Presupuesto..... | 59 |
| 8. Presupuesto | 60 |
| 8.1. Introducción | 60 |
| 8.2. Costes de la mano de obra..... | 60 |
| 8.3. Costes de nuevos componentes..... | 61 |
| 8.4. Amortizaciones..... | 61 |
| 8.5. Coste de la utilización de los equipos..... | 62 |
| 8.6. Costes del Software | 62 |
| 8.7. Resumen del presupuesto | 63 |
| Anexos..... | 65 |
| Anexo 1: Imágenes de la inyección del chorro agua-urea..... | 67 |
| Anexo 2: Gráficas de resultados | 69 |
| Planos..... | 75 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 2.1. Gráfico de las emisiones de un MEC..... | 16 |
| Figura 2.2. Tabla de la evolución de las normativas Euro | 17 |
| Figura 2.3. Funcionamiento de un catalizador SCR [8] | 20 |
| Figura 2.4. Sistema SCR típico de un vehículo | 21 |
| Figura 2.5. Visualización del chorro agua-urea con DBI [1]..... | 22 |
| | |
| Figura 3.1. Instalación generadora del flujo de aire | 24 |
| Figura 3.2. Generador del flujo de aire | 24 |
| Figura 3.3. Caudalímetro | 25 |
| Figura 3.4. Calentador de aire | 25 |
| Figura 3.5. Variador de frecuencia..... | 26 |
| Figura 3.6. Brida de control de la temperatura | 27 |
| Figura 3.7. Termorregulador | 28 |
| Figura 3.8. Generador de señales del inyector | 28 |
| Figura 3.9. Genotec..... | 29 |
| Figura 3.10. Osciloscopio Yokogawa..... | 29 |
| | |
| Figura 4.1. Elementos y disposición para la visualización óptica | 31 |
| Figura 4.2. Cámara con las lentes acopladas..... | 32 |
| Figura 4.3. Maqueta de visualización..... | 32 |
| Figura 4.4. Carrito | 33 |
| Figura 4.5. Soporte para la maqueta de visualización | 34 |
| Figura 4.6. Bridas de entrada (izquierda) y salida (derecha) de la maqueta de visualización..... | 34 |
| Figura 4.7. Acoplamiento de la maqueta de visualización con el carrito..... | 35 |
| Figura 4.8. Función de la lente Fresnel | 35 |
| Figura 4.9. Ejemplo de un difusor de luz..... | 36 |
| Figura 4.10. Diodo LED | 36 |
| Figura 4.11. Plan de ensayos | 37 |
| Figura 4.11. Posiciones de visualización del chorro..... | 38 |
| | |
| Figura 5.1.1. Simplificación del procesado de imágenes para la obtención del diámetro..... | 40 |
| Figura 5.1.2. Simplificación del procesado de imágenes para la obtención de la velocidad | 41 |

| | |
|--|----|
| Figura 5.2.1. Distribución del Diámetro de las gotas a diferentes presiones en P1 | 42 |
| Figura 5.2.2 Distribución del Diámetro de las gotas a diferentes presiones en P2 | 43 |
| Figura 5.2.3 Distribución del Diámetro de las gotas a diferentes presiones en P3 | 44 |
| Figura 5.2.4. Distribución de la velocidad en el eje Y a distintas presiones en P1 | 45 |
| Figura 5.2.5. Distribución de la velocidad en el eje Y a distintas presiones en P2 | 45 |
| Figura 5.2.6. Distribución de la velocidad en el eje Y a distintas presiones en P3 | 46 |
| Figura 5.2.7. Distribución de la velocidad en el eje X a distintas presiones en P1 | 47 |
| Figura 5.2.8. Distribución de la velocidad en el eje X a distintas presiones en P2 | 47 |
| Figura 5.2.9. Distribución de la velocidad en el eje X a distintas presiones en P3 | 48 |
| Figura 5.2.10. Distribución del diámetro de las gotas a dos temperaturas distintas en P1 | 49 |
| Figura 5.2.11. Distribución del diámetro de las gotas a dos temperaturas distintas en P2 | 50 |
| Figura 5.2.12. Distribución de la velocidad en el eje X a distintas temperaturas en P1 | 51 |
| Figura 5.2.13. Distribución de la velocidad en el eje X a distintas temperaturas en P2 | 51 |
| Figura 5.2.14. Distribución de la velocidad en el eje X a distintas temperaturas en P3 | 52 |
| Figura 5.2.15. Distribución de la velocidad en el eje Y a distintas temperaturas en P1 | 53 |
| Figura 5.2.16. Distribución de la velocidad en el eje Y a distintas temperaturas en P2 | 53 |
| Figura 5.2.17. Distribución de la velocidad en el eje Y a distintas temperaturas en P3 | 54 |
| | |
| Figura 8.1. Tabla de costes de mano de obra | 60 |
| Figura 8.2. Tabla de costes de nuevos componentes | 61 |
| Figura 8.3. Tabla de amortizaciones | 61 |
| Figura 8.4. Tabla de costes de consumo eléctrico | 62 |
| Figura 8.5. Tabla de costes de otros consumibles | 62 |
| Figura 8.6. Tabla de costes del Software..... | 62 |
| Figura 8.7. Resumen y presupuesto total | 63 |

Parte I

Memoria

1. Introducción

1.1. Antecedentes

El Centro de Motores Térmicos (CMT) es un centro de investigación y educación dedicado al desarrollo de los motores de combustión y asociado al Departamento de Máquinas y Motores Térmicos (DMMT). Desde su creación, se han realizado múltiples estudios para la optimización del funcionamiento del motor, tanto a través de pruebas experimentales como mediante cálculo teórico, para grandes empresas, como Nissan, Jaguar Land Rover o RENFE.

La línea de inyección cuenta con unas grandes instalaciones para medir todo tipo de parámetros en diferentes condiciones de funcionamiento, lo cual convierte al CMT en un gran lugar para llevar a cabo este trabajo final de grado.

El estudio de la inyección de urea ha cobrado importancia en los últimos años debido al constante desarrollo de las normativas de emisión de contaminantes que ha dado lugar a incorporación de los sistemas SCR (Selective Catalytic Reduction) a los vehículos ligeros y turismos.

En este centro ya se han llevado a cabo algunos trabajos similares, como el de Salvador Griñán Egea en 2017 [2], que se centra en el diseño de la instalación experimental de flujo de aire que simula las condiciones de escape de un motor, o el de Jose Pérez Rodrigo en 2018 [1], más enfocado en el estudio de la inyección de urea y en la medición de la masa inyectada.

1.2. Objetivos

El objetivo final de este trabajo es analizar la influencia que tienen ciertos parámetros, como la presión de inyección, la temperatura de los gases de escape o la masa inyectada, en el desarrollo del chorro de urea. Específicamente se determinarán experimentalmente los diámetros y las velocidades de las gotas de urea para diferentes condiciones de operación. Para ello es necesario seguir los siguientes pasos:

- **Montaje de la instalación:** son muchos los elementos necesarios para llevar a cabo el estudio de la inyección y todo el montaje tanto de la parte de la visualización óptica como la de la instalación de flujo de aire requiere tiempo de preparación.
- **Calibración de sensores y software:** además de la puesta a punto de los termopares, manómetros y caudalímetros para el control de la instalación, algunos elementos como la cámara requieren de un software específico para su control que hay que preparar.
- **Visualización de la inyección:** una vez que todo está listo se procede a realizar las medidas experimentales que en este trabajo consiste en la visualización del chorro agua-urea a distintos puntos de funcionamiento.
- **Procesamiento de las imágenes y análisis:** una vez obtenidas las imágenes, estas se procesan para determinar los parámetros de interés de este proyecto: el diámetro y la velocidad de las gotas, en tres posiciones distintas del chorro.

1.3. Justificación

Con el paso de los años, los problemas de contaminación que afectan a todo el mundo se han ido agravando y, en algunos países muy poblados como China, empiezan a ser especialmente importantes. Los contaminantes emitidos a la atmósfera no solo son nocivos para el medio ambiente (calentamiento global, destrucción de la capa de Ozono...) sino que también son la causa de algunos problemas de salud que afectan a las personas.

A raíz de estos problemas, se crearon leyes que regulan la emisión a la atmósfera de contaminantes y que se han ido desarrollando todo este tiempo, haciéndose cada vez más restrictivas, con el objetivo de mejorar tanto la salud de las personas como nuestro planeta.

Al mismo tiempo que se desarrollaban las nuevas leyes, nuevos métodos y técnicas para reducir esas emisiones de contaminantes salían a la luz, entre ellas, el sistema SCR, el cual consiste en disminuir la concentración de contaminantes en el escape mediante reacciones químicas con una sustancia conocida como Adblue.

Este sistema ha demostrado poseer una gran eficiencia a la hora de reducir los contaminantes e incluso no supone un coste mucho más elevado que otras alternativas.

Sin embargo, como todas las cosas que nos rodean, el sistema SCR no son todo ventajas y también presenta algunos inconvenientes. El desarrollo de este sistema para reducir estos inconvenientes es el objetivo de muchos estudios alrededor del mundo, así como el de este trabajo.

1.4. Estructura del trabajo

- **Memoria**
 - **Marco teórico:** en esta parte se intenta contextualizar el proyecto introduciendo los distintos tipos de contaminantes, técnicas para evitar su formación o emisión, la normativa, las técnicas ópticas, etc.
 - **Instalación simuladora de las condiciones de escape de un motor:** aquí se explican todos los componentes que forman parte de la instalación, así como su disposición y control.
 - **Visualización óptica:** se detallan los componentes que forman parte de la visualización de la inyección y se comenta el plan de ensayos a seguir para obtener los resultados.
 - **Postratamiento y análisis de resultados:** donde se procesarán las imágenes obtenidas y se analizarán los resultados.
 - **Conclusiones:** para acabar, se detallan los resultados obtenidos dejando en claro bajo qué circunstancias nos interesa trabajar con el sistema SCR y posibles trabajos futuros.
- **Presupuesto:** se detalla el coste total del proyecto indicando los distintos tipos de gastos.
- **Anexos:** se añade información extra como algunas gráficas no enseñadas en la parte de resultados o algunas de las imágenes del chorro obtenidas con la cámara.
- **Planos:** por último, se añaden los planos de los nuevos componentes que se han diseñado en este proyecto o las pequeñas modificaciones realizadas a diseños pasados.

2. Marco teórico

2.1. Emisiones de contaminantes

Como ya se ha comentado en la introducción de este trabajo, los sistemas de combustión son ampliamente utilizados hoy en día y producen una serie de emisiones que pueden ser un gran problema tanto para el medio ambiente como para la salud de las personas. Los contaminantes principales de estos sistemas, en los que se incluyen los motores de combustión interna alternativos (MCIA), son los siguientes:

- **CO:** producido por combustiones lentas en zonas con dosados muy pobres y por oxidaciones incompletas en zonas con dosados ricos, es capaz de reducir la capacidad de transporte del oxígeno en sangre además de contribuir a la destrucción de la capa de ozono.
- **CO₂:** es el principal culpable del desarrollo del efecto invernadero y del calentamiento global.
- **HC:** este compuesto, que puede llegar a ser cancerígeno en grandes cantidades, se produce en zonas con dosados pobres, combustión incompleta, apagado de la llama en las paredes...
- **SO_x:** debido al contenido de azufre el combustible, estos compuestos son uno de los causantes de la conocida "lluvia ácida". En dosados pobres se generan SO₂, SO₃, etc; y en dosados ricos, compuestos como HS o H₂S.
- **NO_x:** estos compuestos tóxicos para la salud y que también contribuyen a la destrucción de la capa de ozono se generan al oxidarse el nitrógeno sobrante en las reacciones de dosados pobres.
- **Partículas:** impurezas del combustible, restos de aceite y lubricante, cenizas... Tienen un efecto negativo sobre el sistema respiratorio.

Concretamente, para un MCIA de encendido por compresión (MEC), la composición de las emisiones es la siguiente [3]:

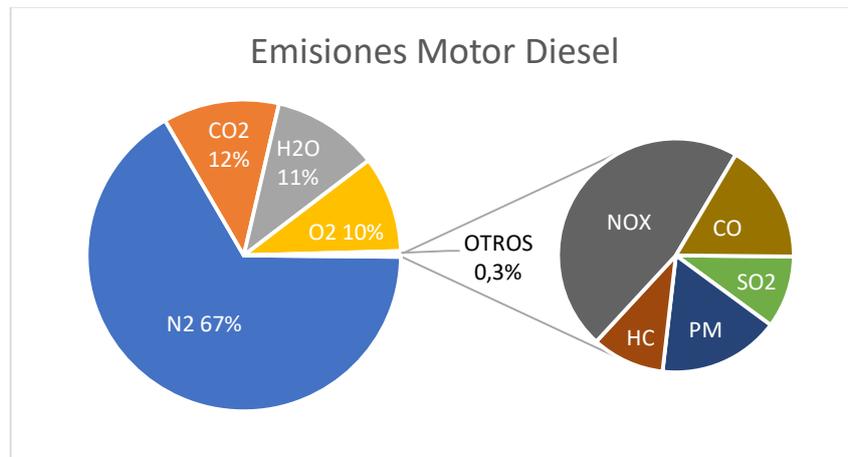


Figura 2.1. Gráfico de las emisiones de un MEC

2.2. Óxidos de nitrógeno (NO_x)

El término óxidos de nitrógeno (N_xO_y) se aplica a varios compuestos químicos binarios gaseosos formados por la combinación de oxígeno y nitrógeno, sin embargo, el monóxido de nitrógeno (NO) y el dióxido de nitrógeno (NO₂) son los más comunes e importantes toxicológicamente siendo los vehículos motorizados (sobre todo los diésel y de mezcla pobre) los mayores culpables de la emisión de estos compuestos a la atmósfera. Estas son algunas de las razones por la que es necesario evitar la emisión de NO_x:

- Inducen al edema pulmonar, daño celular, irritación, exacerbación de asma...
- Participan en la formación del smog fotoquímico, así como en el fenómeno de la lluvia ácida.
- Destrucción de la capa de ozono.
- Producen daños a las plantas y corroen tejidos diversos.

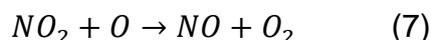
Aunque las causas de la formación de los NO_x son diversas, el principal motivo son las altas temperaturas que se generan en la combustión que hacen oxidarse al nitrógeno (mecanismo térmico):



Posteriormente, el NO reacciona junto con el vapor de agua producido en regiones con temperaturas más bajas para formar el NO₂:



En este punto, generalmente se emitiría el NO₂ a la atmósfera, pero se pueden dar situaciones en las que este compuesto pueda disociarse de nuevo en NO a causa de un recalentamiento:



2.3. Normativas de control de emisiones

A raíz de los problemas de contaminación presentes en nuestro planeta, se crearon normativas que controlasen las emisiones de estos contaminantes y, a lo largo de los años, se han ido desarrollando y creando nuevas leyes cada vez más restrictivas. Aunque no en todos los países se rigen por la misma normativa, no se diferencian mucho unas de otras. La Unión Europea sigue las normativas Euro.

La Euro 0, que entró en vigor en 1988, fue la primera ley sobre el control de las emisiones de contaminantes en la Unión Europea pero no es hasta 1992, con la Euro 1, cuando las restricciones comienzan a hacerse más visibles. A partir de aquí se crearon la Euro 2 (1996), la Euro 3 (2000), la Euro 4 (2005), la Euro 5 (2009) y la vigente actualmente, la Euro 6 (2014).

A la Euro 6, se le han hecho algunas modificaciones los últimos años para reducir todavía más las emisiones contaminantes y todo apunta a que una nueva normativa más restrictiva, la Euro 7, se apruebe a lo largo de 2020 [9].

Estas leyes siempre han diferenciado entre el tipo de vehículo y combustible utilizado (diésel o gasolina) a la hora de establecer los límites de las emisiones. En la figura 2.2 se muestran las emisiones contaminantes permitidas en g/km para el caso de los turismos [10]:

| COMBUSTIBLE | LEY | CO | HC | HC+NOX | NOX | PM |
|--------------------|------------|-----------|-----------|---------------|------------|-----------|
| DIÉSEL | Euro 1 | 2.72 | - | 0.97 | - | 0.14 |
| | Euro 2 | 10 | - | 0.7 | - | 0.08 |
| | Euro 3 | 0.64 | - | 0.56 | 0.5 | 0.05 |
| | Euro 4 | 0.50 | - | 0.3 | 0.25 | 0.025 |
| | Euro 5 | 0.50 | - | 0.23 | 0.18 | 0.005 |
| | Euro 6 | 0.50 | - | 0.17 | 0.08 | 0.005 |
| GASOLINA | Euro 1 | 2.72 | - | 0.97 | - | - |
| | Euro 2 | 2.2 | - | 0.5 | - | - |
| | Euro 3 | 1.0 | 0.2 | - | 0.15 | - |
| | Euro 4 | 1.0 | 0.1 | - | 0.08 | - |
| | Euro 5 | 1.0 | 0.1 | - | 0.06 | 0.005 |
| | Euro 6 | 1.0 | 0.1 | - | 0.06 | 0.005 |

Figura 2.2. Tabla de la evolución de las normativas Euro

2.4. Reducción de emisiones en los MEC

Como se puede ver en el apartado anterior, a lo largo de los años, han ido aumentando las restricciones en la emisión de contaminantes. Por este motivo, nuevas técnicas aparecieron para reducir estas emisiones y otras continúan todavía en desarrollo. Se puede diferenciar entre dos clases de técnicas [4]:

- **Técnicas activas:** actúan con el objetivo de reducir la formación de sustancias contaminantes optimizando los procesos de combustión, inyección...
- **Técnicas pasivas:** se centran en eliminar las sustancias contaminantes ya producidas con filtros, catalizadores, etc.

Técnicas activas

- **EGR (Exhaust gas recirculation):** el Sistema EGR reenvía una parte de los gases de escape al colector de admisión, con ello se consigue que descienda el contenido de oxígeno en el aire de admisión, con lo cual, provoca un descenso en la temperatura de combustión que reduce el óxido de nitrógeno (NOx). Sin embargo, hay que precisar que la emisión de NOx en los motores Diesel solamente es posible reducirla por este método alrededor de un 50% y para mayores tasas de reducción debe recurrirse a otros sistemas, como el empleo de catalizadores. Sin embargo, este sistema tiene el inconveniente de aumentar las emisiones de hidrocarburos sin quemar y partículas como el hollín.

- **Enfriamiento del aire de admisión:** como hemos comentado en la técnica anterior, una reducción de la temperatura de combustión hace que se formen menos óxidos de nitrógeno y esto se puede conseguir si colocamos un intercambiador de calor en la admisión.

- **Limitador de humos:** la finalidad del limitador de humos es regular la dosificación de combustible para controlar los humos emitidos y es el turbo compresor el encargado de la regulación del limitador. Cuando el motor funciona bajo una gran carga a una baja velocidad, el limitador de humos impide que la bomba de inyección entregue la mayor cantidad posible de combustible (se reduce con esto la cantidad de hidrocarburos sin quemar que salen por el tubo de escape) y cuando el motor adquiere mayor velocidad, la combustión mejora y se reduce la eliminación de humos [5].

Técnicas pasivas

- **Reactores térmicos:** no son muy usados hoy en día debido a su elevado coste frente a otras alternativas, pero es una solución para oxidar el CO y los hidrocarburos para producir H₂O y CO₂.

- **Reducción catalítica selectiva o SCR (Selective Catalytic Reduction):** este sistema disminuye la concentración de óxidos de nitrógeno en los gases de escape gracias a reacciones químicas. Es de los más usados y se explicará detalladamente en el siguiente apartado.
- **Filtros químicos:** el más usado es el sistema LNT (Lean NOx Trap), con el cual es posible reducir las emisiones de NOx a la atmósfera. Consiste en atrapar los óxidos de nitrógeno sobre un sustrato, generalmente formado por nitratos de bario, oxidar lo NOx mediante un catalizador de oxidación y, posteriormente, reducir el compuesto en nitrógeno y oxígeno antes de liberarlos. Es una de las opciones para disminuir las emisiones de NOx que no requiere rellenar un depósito con Adblue u otro producto (algo que sí es necesario en otras alternativas), pero los óxidos de azufre que se forman al quemar el combustible pueden provocar un mal funcionamiento del sistema al absorberlos [6].
- **Filtros de partículas:** los filtros de partículas diésel o DPF (Diesel Particulate Filter) se encarga de retener en ellos restos de hollín, inquemados y diferentes tipos de partículas procedentes de la combustión. Estos filtros constan de un cuerpo cerámico alveolar de carburo de silicio, alojado en una carcasa de metal. El cuerpo de cerámica está dividido por una gran cantidad de pequeños conductos paralelos, cerrados de forma alternativa. De ahí resultan conductos de admisión y escape separados por las paredes filtrantes. Los gases de escape con cargas de hollín pasan por estas paredes filtrantes porosas de carburo de silicio mientras que las partículas de hollín son retenidas en los conductos de entrada [7].

2.5. Sistemas de reducción catalítica selectiva (SCR)

Como hemos comentado anteriormente, el sistema de reducción catalítica selectiva o SCR es un reactor químico que se centra en la reducción de los óxidos de nitrógeno mediante reacciones químicas y, sobre todo, es utilizado en el sector de la automoción.

Este sistema hace su aparición a finales de la década pasada pero no es hasta principios de esta década que empieza a cobrar importancia debido al constante desarrollo de las normativas sobre la emisión de contaminantes cada vez más estrictas.

El proceso de reducción de los NOx se lleva a cabo mediante una sustancia conocida como Adblue, la cual consiste en una disolución de urea al 32,5% en agua (AUS32). Esta sustancia, principalmente formada por amoníaco, es vaporizada, diluida con aire e inyectada directamente sobre los gases de escape del motor.

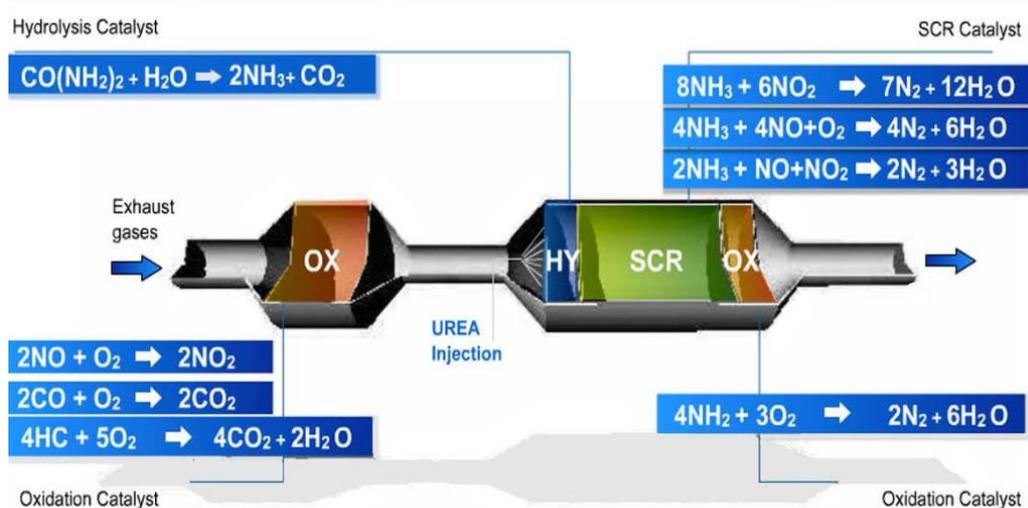


Figura 2.3. Funcionamiento de un catalizador SCR [8]

Los gases de escape procedentes de la combustión pasan por una primera fase de oxidación donde el catalizador convierte el NO en NO₂ y reduce las concentraciones de CO y HC. Acto seguido, se inyecta la solución de urea o Adblue y se lleva a cabo una hidrólisis, la cual consigue separar el NH₃ de la mezcla. Posteriormente, los gases atraviesan el catalizador SCR en sí donde se reducen los NO_x y el amoníaco inyectado en nitrógeno y vapor de agua. Por último, un catalizador de oxidación se ocupa de transformar el amoníaco sobrante en nitrógeno y vapor de agua antes de verter los gases a la atmósfera.

Son varias las razones por las que se está utilizando, cada vez más, el sistema SCR, estas son algunas de ellas:

- Se trata de uno de los sistemas de postratamiento con mayor eficiencia del mercado (superior al 80%).
- Es más barato que algunas de las alternativas como el LNT.
- Puede funcionar casi para cualquier punto de funcionamiento del motor gracias a su estabilidad térmica.
- Utilizado como complemento del sistema EGR, permite una reducción de los gases recirculados, mejorando la eficiencia de la combustión.

Por otra parte, la principal desventaja que presenta este sistema es el poco espacio disponible en vehículos ligeros, ya que, para su funcionamiento, son necesarios varios elementos como un depósito, una red de distribución, un sistema de dosificación, etc. Esto requiere que la instalación y sus componentes sean compactos y dificulta el proceso de mezcla de los gases de escape y el Adblue.

Otras de las desventajas que presenta el sistema SCR es la incorporación de una sustancia extra (Adblue) que no requieren otras alternativas y que los NO_x no se ven reducidos en los primeros instantes de funcionamiento debido a que las reacciones de reducción necesitan una temperatura entre 200 y 500°C para llevarse a cabo de forma óptima.

Disminuir la distancia necesaria o la tasa de inyección de urea para mejorar la eficiencia del proceso puede permitir la reducción de algunas de las desventajas del sistema como, por ejemplo, el problema del espacio al eliminar algunos componentes que, después de la mejora, ya no sean necesarios.

La figura 2.4 representa un esquema de un sistema SCR para vehículos:

Sistema de tratamiento de gases de escape SCR

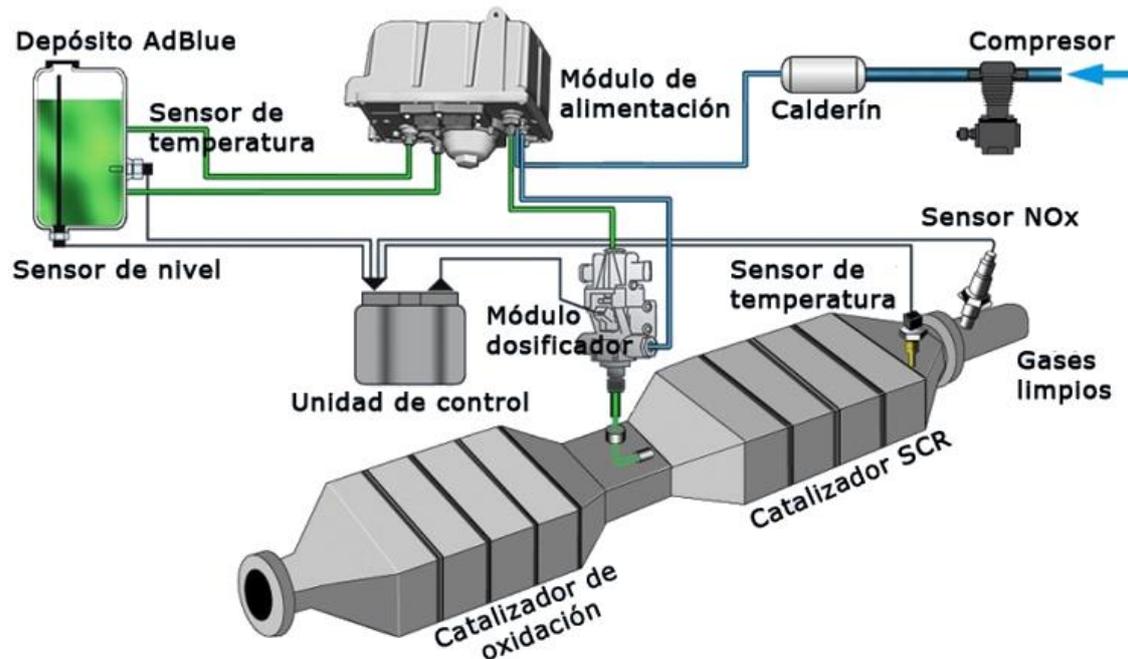


Figura 2.4. Sistema SCR típico de un vehículo

2.6. Componentes del sistema de inyección de urea

La figura 4 representa un sistema estándar de inyección de urea que podemos encontrar en los vehículos. Algunos de los elementos más importantes son:

- **Depósito de Adblue:** es el lugar donde se almacena la urea o Adblue. Este incluye un sensor de nivel y uno de temperatura para controlar el combustible disponible y evitar su congelamiento.
- **Módulo de alimentación:** succiona la urea del depósito y la envía hacia el módulo de dosificación a una determinada presión.
- **Módulo de dosificación:** es el inyector propiamente dicho. Aquí es donde se produce la mezcla aire-urea y permite su inyección o no dependiendo de la señal de la unidad de control.
- **Unidad de control:** es el elemento que recoge toda la información de los diferentes sensores de la instalación y envía las señales correspondientes al módulo de dosificación.

- **Calderín:** se trata del depósito del aire suministrado al sistema y mantiene su presión constante durante el funcionamiento. Debido al problema de espacio en los vehículos ligeros, para este tipo de vehículos se ha prescindido del aire comprimido y el fluido inyectado es únicamente urea.

2.7. Técnicas ópticas para la visualización microscópica del chorro agua-urea

Para ser capaces de visualizar un chorro inyectado en detalle (es este caso, la solución agua-urea) es necesario la aplicación de técnicas ópticas. Existen multitud de técnicas diferentes con sus ventajas y desventajas cada una, como la técnica de Schlieren, o la de Moiré, pero la que se utiliza en este proyecto es la técnica de iluminación trasera difusa (DBI).

Esta técnica ha sido empleada de forma extensiva para el estudio de distintos tipos de inyección y sus resultados han sido bastantes buenos y de gran utilidad.

El fundamento de la misma consiste en la obtención de imágenes de la sombra que proyecta el chorro al ser atravesado por un haz de luz uniforme, obtenido de una lámpara estroboscópica continua [11]. En este caso, dicha técnica ha sido adaptada para un estudio en ambiente evaporativo, de manera que la sombra que se proyecta se corresponde únicamente con la ubicación de la fase líquida del chorro. Las imágenes obtenidas son algo como la figura 2.5:



Figura 2.5. Visualización del chorro agua-urea con DBI [1]

3. Instalación para simular las condiciones de escape de un motor

La instalación experimental de este proyecto consta de dos partes bien diferenciadas: la instalación que genera el flujo de aire y que simula las condiciones de escape del motor y la parte de la visualización óptica del chorro agua-urea. En este punto se tratará la instalación generadora del flujo de aire.

3.1. Componentes de la instalación

La instalación que se utiliza en este proyecto para generar el flujo de aire fue diseñada en 2017 por Salvador Griñán Egea [2] en su Trabajo Final de Grado. La finalidad de esta instalación es reproducir las condiciones de flujo de un escape de motor de combustión en términos de temperatura y caudal, en un amplio rango de funcionamiento.

En ese trabajo se explica detalladamente el diseño de la instalación, el funcionamiento de cada componente, la justificación de su incorporación a la instalación, etc. Por este motivo, en el presente trabajo no nos detendremos a explicar todo esto y únicamente se mencionarán los componentes más importantes.

La siguiente imagen muestra la instalación que genera el flujo de aire.

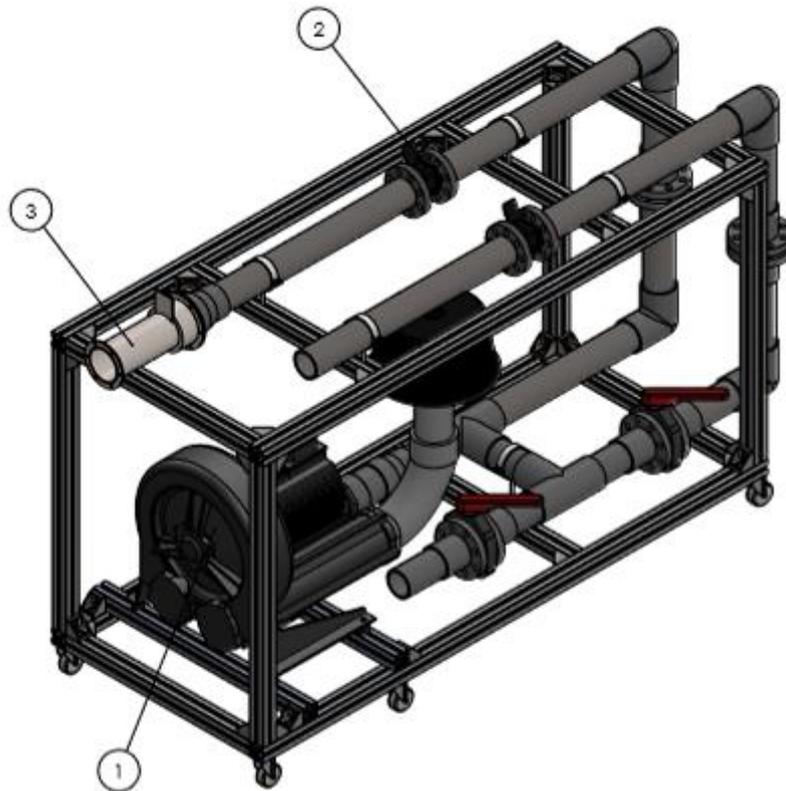


Figura 3.1. Instalación generadora del flujo de aire

Los elementos más importantes de la instalación son:

1. **Soplador:** es el encargado de generar el flujo de aire para simular las condiciones de escape de un motor. Modelo FPZ K07 MS.

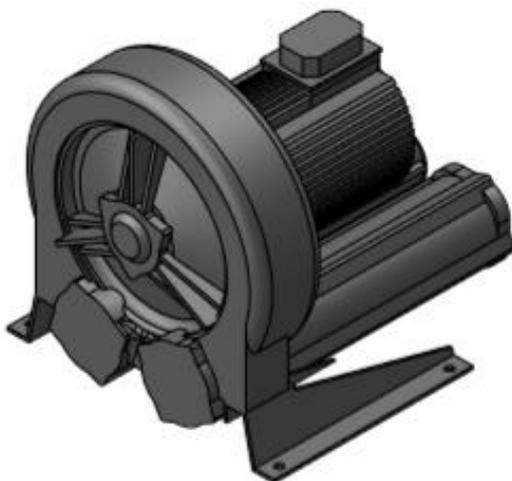


Figura 3.2. Generador del flujo de aire

2. **Caudalímetro:** necesario para medir el caudal de aire generado por el soplador. Modelo Siemens 5WK9623.

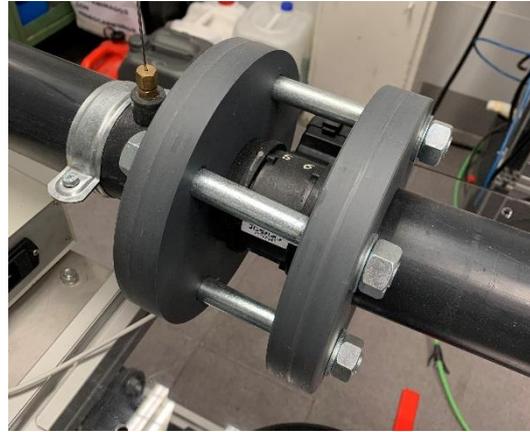


Figura 3.3. Caudalímetro

3. **Calentador del aire:** básicamente, es una resistencia eléctrica que se encarga de calentar el aire para asemejarse más a las condiciones reales de un motor. Modelo Leister LE 10000 DF-R HT.



Figura 3.4. Calentador de aire

3.2. Elementos de control

La razón por la que los elementos mencionados anteriormente son los más importantes de cara a este proyecto es porque son los componentes que se deben controlar para realizar los diferentes ensayos. Estos parámetros que, además, se modificarán para realizar distintos ensayos son:

- **Caudal de aire:** como se ha comentado anteriormente, el soplador es el que genera el flujo de aire. Dependiendo de la frecuencia de giro, el flujo de aire generado por el soplador será mayor o menor y para controlar esto se ha utilizado un variador de frecuencia de 3.7 kW como el que se muestra en la figura 3.5.



Figura 3.5. Variador de frecuencia

El variador de frecuencia permite variar el flujo de aire, sin embargo, no se puede conocer el caudal de aire solo con este elemento. Para ello es necesario la utilización del caudalímetro; de esta forma, se varía el caudal de aire con el variador de frecuencia y se mide con el caudalímetro.

- **Temperatura del aire:** la función de calentar el aire la lleva acabo una resistencia eléctrica, que calentará el aire dependiendo de la corriente eléctrica suministrada, pero, al igual que pasa con el caudal de aire, no basta con solo la resistencia para conocer la temperatura. Para poder medirla se ha colocado una brida (la llamaremos brida de control de temperatura) entre el calentador del aire y la maqueta de visualización en la cual hay unos agujeros por donde se introducen los termopares que medirán la temperatura.

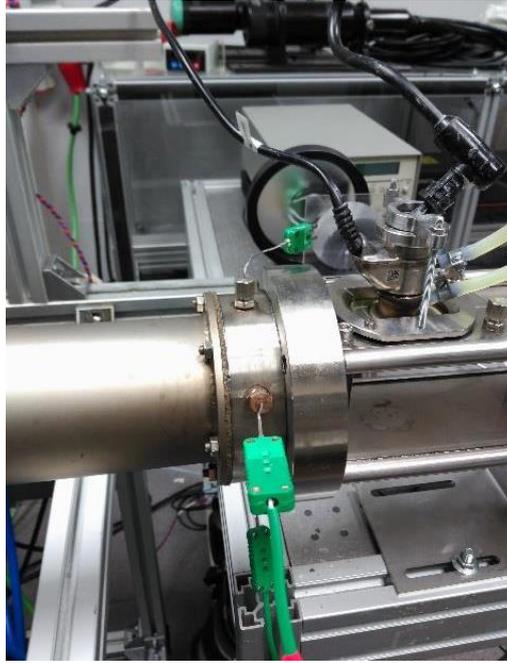


Figura 3.6. Brida de control de la temperatura

Estos termopares mandan la señal de temperatura medida en forma de señal eléctrica hasta un PID que también está conectado con la resistencia eléctrica. Este PID muestra la temperatura medida por los termopares y permite modificarla ya que también controla el suministro de corriente eléctrica de la resistencia. De esta forma, se indica al PID que temperatura se quiere obtener y este aumenta o disminuye la corriente eléctrica suministrada a la resistencia hasta obtener el valor deseado por los termopares.

3.3. Otros elementos de control

Además de los elementos que controlan la instalación que genera el flujo de aire, existen otros parámetros y componentes que se deben controlar para realizar los ensayos y que no forman parte de la instalación mencionada ni de la parte de la visualización óptica. Estos son los relacionados con la propia inyección de urea.

- **Presión de inyección:** al tratarse de inyecciones a presiones bajas (entre 4 y 8 bar) la presión es suministrada por el propio sistema de aire comprimido del CMT y está controlada por dos manómetros, uno está situado en el punto de alimentación de la red del edificio y el que mide la presión de inyección del chorro agua-urea, justo encima del depósito del líquido.

- **Temperatura del inyector:** para evitar sobrecalentamientos del inyector y que esto conlleve alteraciones en los resultados, se hace uso de un termostato como el de la figura 3.7 para mantener su temperatura constante.



Figura 3.7. Termorregulador

- **Señal del inyector:** el tiempo que dura la inyección y la frecuencia de las repeticiones son también parámetros que se tienen que controlar. Estos parámetros los genera un generador de señales como el de la figura 3.8, el cual se controla gracias al programa informático llamado MagnetInyectorV2.



Figura 3.8. Generador de señales del inyector

Una vez creada esta señal, el generador de señales manda la información a otro componente llamado Genotec (figura 3.9). Este elemento es el encargado de abrir y cerrar el inyector en función de la señal recibida.



Figura 3.9. Genotec

- **Osciloscopio:** por último, se conecta un osciloscopio (figura 3.10) a varios puntos diferentes de la instalación para visualizar y registrar algunas lecturas. Estas lecturas son la corriente suministrada a la resistencia, la señal del inyector y el caudal de aire.



Figura 3.10. Osciloscopio Yokogawa

4. Visualización Óptica

4.1. Montaje y componentes

En este punto se explica toda la parte que se relaciona con la visualización óptica del chorro agua-urea, sin embargo, en el Trabajo de Final de Grado de Jose Pérez Rodrigo [1] se explica detalladamente toda esta parte de la instalación; por tanto, nos centraremos más en las partes que se han modificado para este proyecto.

Para la visualización microscópica del chorro agua-urea se utiliza la técnica de iluminación trasera difusa (DBI) y el montaje utilizado para este proyecto es el que se ve en la figura 4.1.

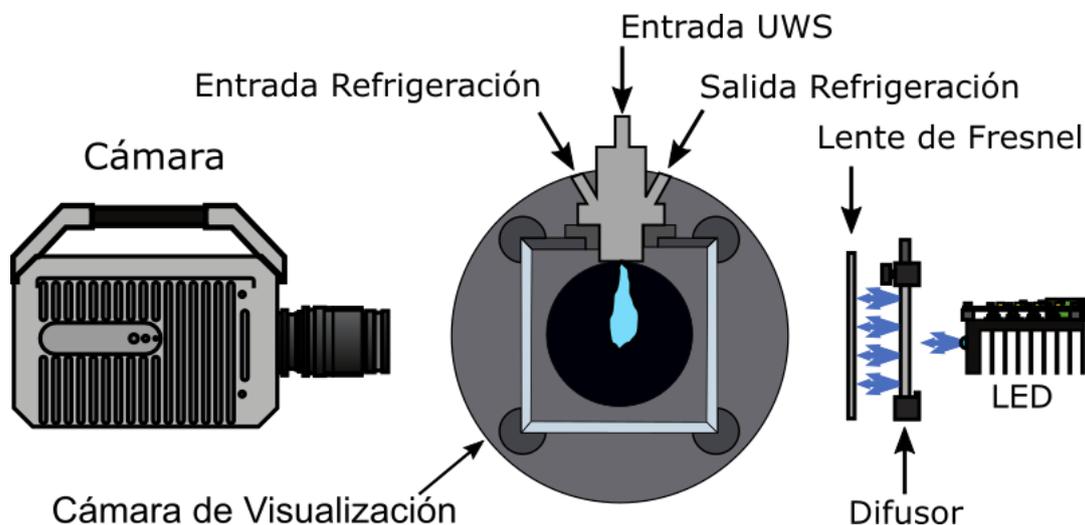


Figura 4.1. Elementos y disposición para la visualización óptica

En este esquema se puede observar, de izquierda a derecha, la cámara, la maqueta de visualización, una lente Fresnel, un difusor de luz y un diodo emisor de luz (LED).

- **Cámara:** se trata de una cámara rápida modelo Photron SA5 que es capaz de tomar miles de fotogramas por segundo (fps). A la cámara van acopladas dos lentes que, según el caso, permiten captar hasta 150.000 fps con una resolución de 40.2 píxeles por mm.

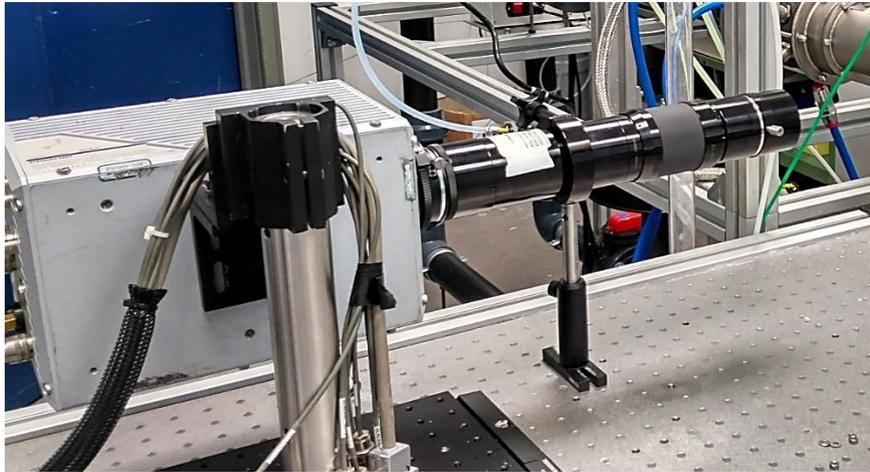


Figura 4.2. Cámara con las lentes acopladas

- **Maqueta de visualización:** en la figura 4.3 se muestra la maqueta utilizada en este proyecto y su diseño se presenta en el TFG de Salvador Griñán Egea en 2017 [2] junto a la instalación que genera el flujo de aire.

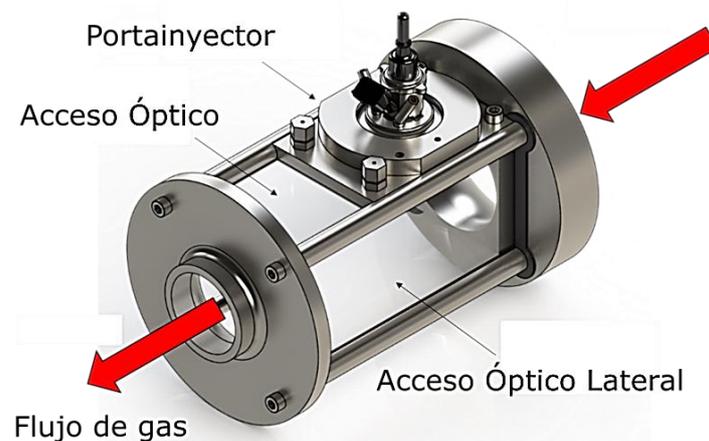


Figura 4.3. Maqueta de visualización

Consta de dos bridas, una brida de entrada que va acoplada a la brida de control de temperatura y una de salida para el escape, cuatro ventanas que funcionan como accesos ópticos y un portainyector adaptable a 45 y 90°; aunque en este proyecto solo se realizarán ensayos con el inyector formando 90° con el flujo de aire.

Para mejorar la accesibilidad y el montaje de la maqueta de visualización a la instalación que genera el flujo de aire, se decidió diseñar un carrito y un soporte para acoplar la maqueta al carrito. Otra de las razones por la que se decidió esto fue porque el depósito de Adblue junto al manómetro y otras partes de la instalación de la inyección estaban colocadas en la estructura de la instalación del flujo de aire y esta instalación se comparte con otros proyectos; por lo que el montaje y desmontaje de todo lo referente a este proyecto era tedioso.

Con esta idea lo que se consigue es que el depósito y los otros elementos de la inyección vayan acoplados al carrito y, una vez montados, solo habría que desacoplar la maqueta de visualización de la brida de control de la temperatura cuando se quiera utilizar la instalación para otros proyectos.

La figura 4.4 muestra el carrito que fue diseñado utilizando, íntegramente, con perfiles Fasten, escuadras para las uniones y ruedas para la movilidad. Las dimensiones y la cantidad de componentes que lo forman se detallan en la parte Planos.



Figura 4.4. Carrito

El soporte para acoplar la maqueta de visualización al carrito se diseñó para que fuera simple, económico y que no fuera necesario alterar en exceso la maqueta de visualización. Con esta idea se obtuvo el soporte de la figura 4.5.

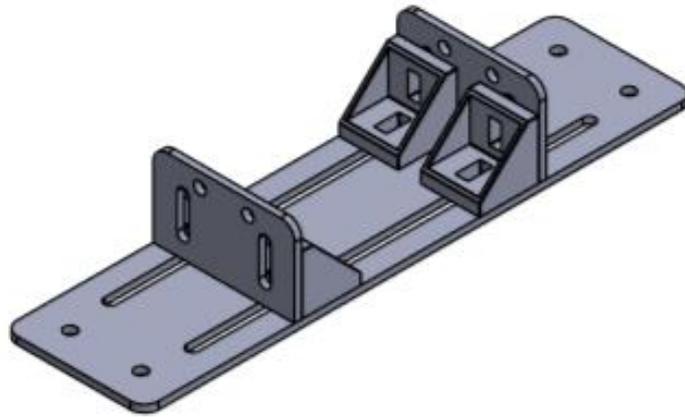


Figura 4.5. Soporte para la maqueta de visualización

Como se ve en la imagen, el soporte está formado por tres piezas simples (dos de ellas iguales) unidas por el mismo tipo de escuadras que las del carrito. A las dos piezas iguales le llamaremos placas interiores y a la restante, placa inferior. Los planos de ambas piezas se encuentran en la parte Planos.

Este soporte va unido al carrito mediante tuercas por los agujeros en los extremos de la placa inferior y a la maqueta de visualización con tornillos por los agujeros en la parte superior de las placas interiores. Para ello, ha sido necesario realizar unos agujeros no pasantes en la parte interior de las bridas de entrada y salida de la maqueta de visualización como se muestra en la figura 4.6. Los detalles de esta modificación se encuentran en la parte Planos.

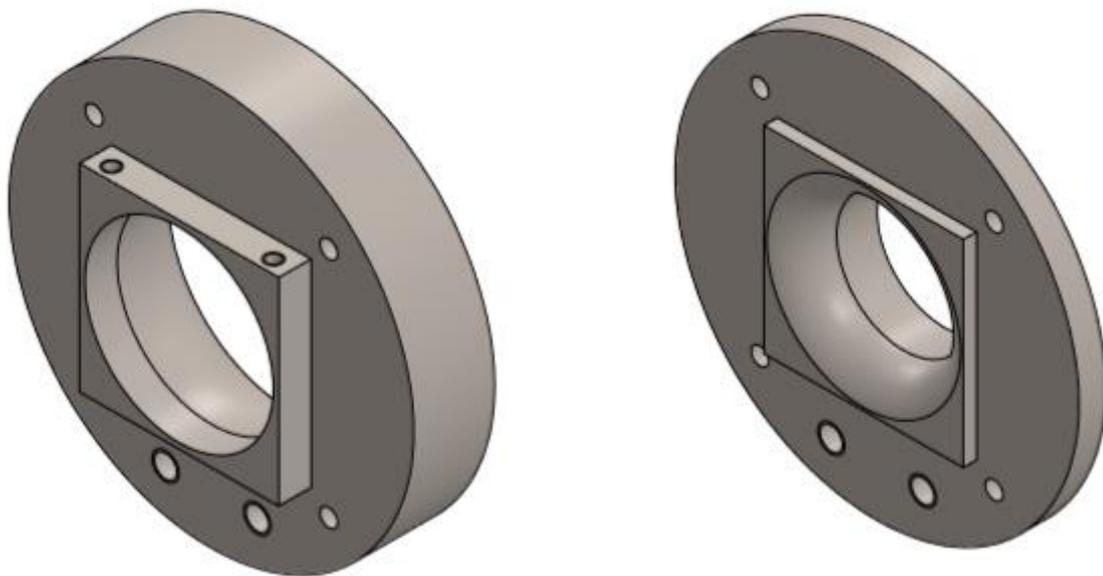


Figura 4.6. Bridas de entrada (izquierda) y salida (derecha) de la maqueta de visualización

De esta manera, el acoplamiento de la maqueta de visualización al carrito queda como se muestra en la figura 4.7.

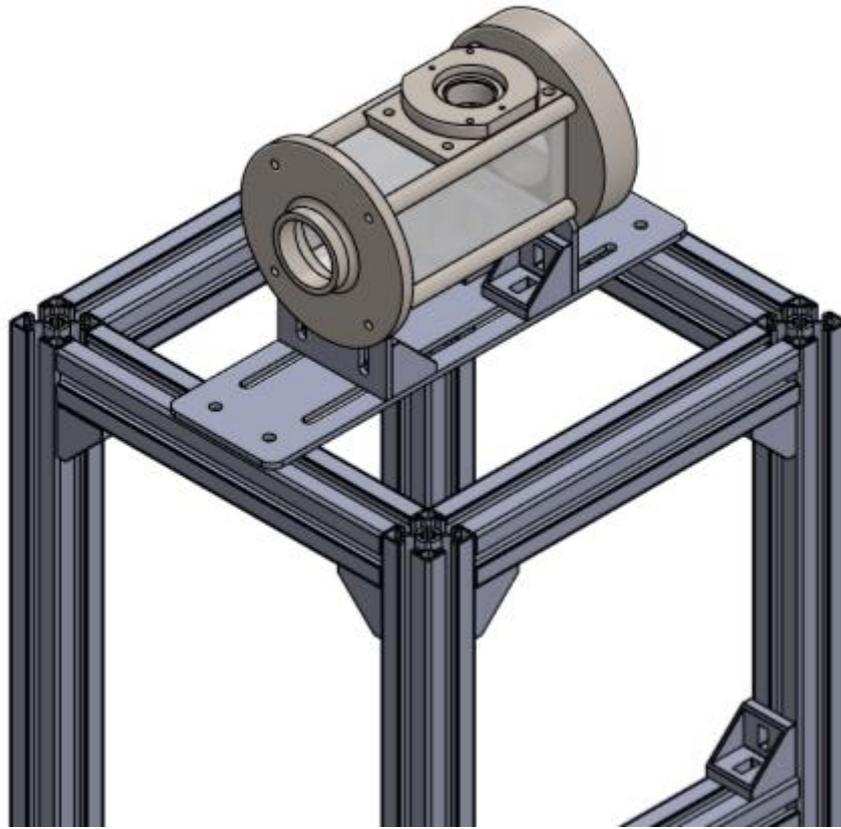


Figura 4.7. Acoplamiento de la maqueta de visualización con el carrito

- **Lente Fresnel:** se utiliza una lente de Fresnel para que actúe como un sistema colimador. Esto es que recoja todos esos haces de luz divergentes que proceden del diodo LED y hacer que vayan paralelos y en dirección a la cámara al atravesar la lente como se puede ver en la figura 4.8 [13].

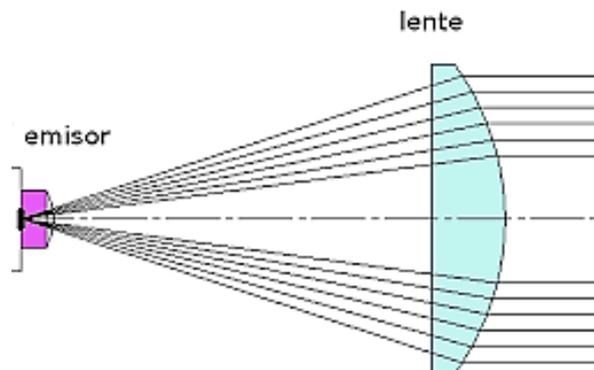


Figura 4.8. Función de la lente Fresnel

- **Difusor de luz:** la función de este elemento es suavizar el impacto de la luz emitida por el LED y crear un fondo más homogéneo para obtener imágenes con mejor calidad. La figura 4.9 muestra un ejemplo del efecto de un difusor de luz.



Figura 4.9. Ejemplo de un difusor de luz

- **Diodo LED:** es la fuente de luz de la instalación. Como se comentó en el marco teórico, la luz emitida por el LED se encarga de generar las sombras en las gotas del chorro agua-urea que serán captadas por la cámara.

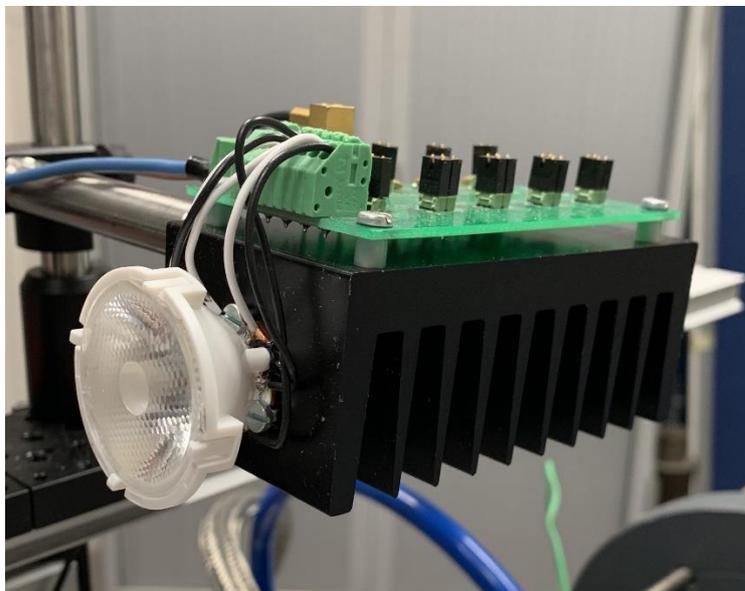


Figura 4.10. Diodo LED

4.2. Plan de ensayos

Como se ha ido comentando a lo largo de este trabajo, el objetivo final es observar cómo afectan varios parámetros de la inyección y del flujo de aire al diámetro y velocidad de las gotas del chorro agua-urea. Se ha decidido que estos parámetros sean la presión de inyección del propio chorro y la temperatura del flujo de aire generado en tres zonas de visualización del chorro. En este proyecto no se estudiará cómo afecta el gasto másico de aire y se establecerá un valor constante de 40 kg/h.

De esta manera, el plan de ensayos quedaría como se muestra en la figura 4.10.

| Posición | Temperatura (°C) | Presión (bar) |
|----------|------------------|---------------|
| 1 | 180 | 4 |
| | | 6 |
| | | 8 |
| | 350 | 4 |
| | | 6 |
| | | 8 |
| 2 | 180 | 4 |
| | | 6 |
| | | 8 |
| | 350 | 4 |
| | | 6 |
| | | 8 |
| 3 | 180 | 4 |
| | | 6 |
| | | 8 |
| | 350 | 4 |
| | | 6 |
| | | 8 |

Figura 4.11. Plan de ensayos

Cabe destacar que para cada uno de los puntos se han realizado 10 repeticiones y las zonas o posiciones de visualización son las que se muestran en la figura 4.11.

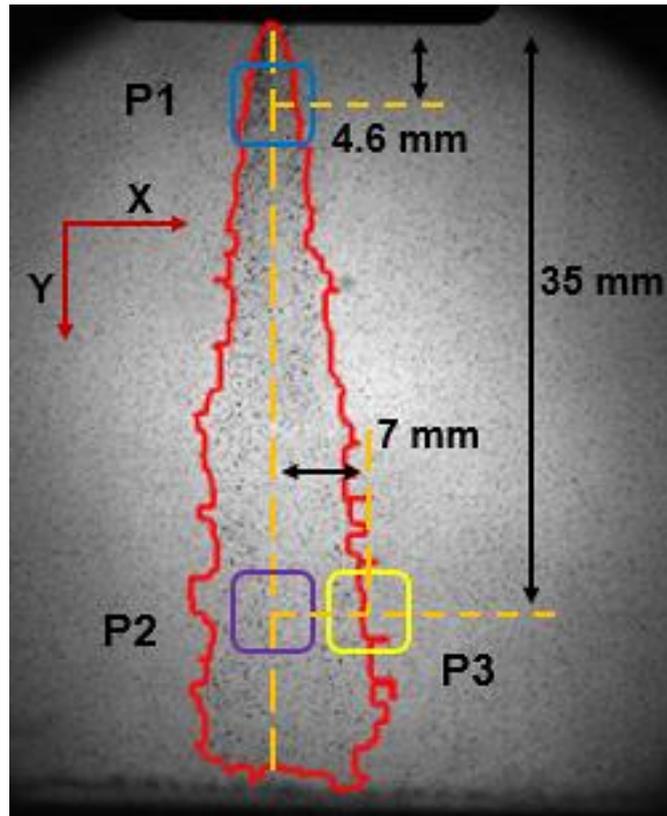


Figura 4.11. Posiciones de visualización del chorro

5. Postratamiento y análisis de resultados

5.1. Procesado de imágenes

Una vez realizados todos los ensayos, la cámara ha permitido obtener una serie de imágenes en las que se puede ver el chorro de agua-urea; sin embargo, para poder analizar sus propiedades, se debe realizar un procesamiento de las imágenes [12].

El primer paso es definir la forma general y los límites del chorro de agua-urea. Para ello es necesario seguir los siguientes pasos:

- **Corrección del fondo:** reflejos, partículas de polvo u otras sustancias presentes pueden generar una mala estimación del chorro; por lo que se aísla el chorro eliminando el fondo. Esto se hace obteniendo unas imágenes antes de la inyección (las cuales se corresponden con el fondo) y se elimina aritméticamente de las imágenes del chorro.
- **Detección de los límites del chorro:** las imágenes muestran la evolución de las sombras oscuras en contraste con el fondo blanco, esas sombras representan la fase líquida del chorro y los límites se calculan binarizando la imagen. Sin embargo, algunas regiones de la imagen muestran distintos tonos de grises que tal vez correspondan con gotas que se están evaporando o que estén fuera del campo de visualización. Para solucionar esto, se introduce un umbral de binarización con el cual se establece que aquellas regiones por encima de este valor se considerarán como gotas. Considerando varios experimentos anteriores para determinar este umbral, se ha establecido que se consideren como gotas las regiones por encima de un 5% de oscuridad.

- **Análisis de contorno:** una vez que se haya obtenido el contorno, es posible calcular algunas características geométricas que permiten localizar adecuadamente las posiciones para el estudio microscópico el chorro.

5.1.1. Determinación del tamaño de las gotas

La mayor dificultad que surge cuando vamos a medir el tamaño de las gotas es que algunas de las gotas aparecen desenfocadas debido a la pequeña profundidad de campo de aproximadamente 1mm. Para superar este problema, es necesario seguir los siguientes pasos:

- **Filtrar las gotas desenfocadas:** gracias a la utilización de un umbral dinámico, es posible filtrar las estructuras desenfocadas de la imagen. Estas gotas tendrán un menor contraste y aparecerán algo más borrosas cuanto más lejos del plano focal se encuentren.
- **Binarización de la imagen:** se realiza otra binarización de la imagen después del filtro con el objetivo de obtener más fácilmente las propiedades que se buscan.
- **Determinación de las propiedades:** para cada gota detectada, se pueden extraer varias propiedades usando una herramienta de procesamiento de imágenes desarrollada en Matlab. Para este caso, se utiliza para calcular el área de las gotas y su localización.
- **Filtrado de las gotas por tiempo de residencia:** frecuentemente durante la medida, bastantes gotas aparecen solo durante un par de imágenes. Con el objetivo de mantener solo aquellas que aparecen durante todo el proceso, un algoritmo analiza las gotas y elimina de las imágenes aquellas gotas que solo aparecen en algunas de ellas. Las gotas obtenidas con este filtro se cruzan con las utilizadas para medir la velocidad de las gotas y solo nos quedamos con las coincidentes.

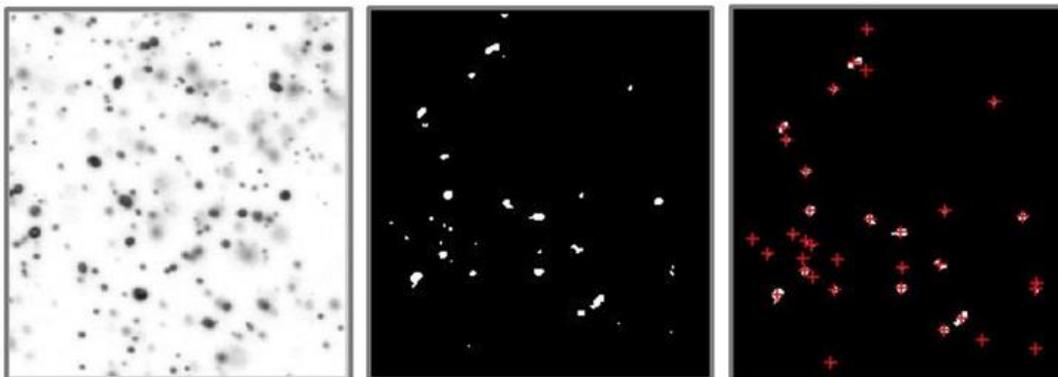


Figura 5.1.1. Simplificación del procesamiento de imágenes para la obtención del diámetro

5.1.2. Determinación de la velocidad de las gotas

Otra de las ventajas de la visualización microscópica es la capacidad de poder seguir las gotas en cada imagen para determinar la velocidad. Esto es posible teniendo en cuenta solo aquellas gotas que cumplen con ciertas características, las cuales son:

- **Detección:** habiendo seguido todo el procedimiento para obtener el tamaño de las gotas, se parte de las gotas que se obtienen al aplicar el filtro por tiempo de residencia explicado en el subapartado anterior. Estas gotas son las que aparecen durante todo el proceso de inyección.
- **Posición imagen a imagen:** se define un radio de búsqueda para ayudar a un algoritmo a localizar las gotas que tienen propiedades similares en imágenes consecutivas.
- **Filtrado por tiempo de residencia:** llegados a este punto, se vuelve a realizar un filtrado por tiempo de residencia como el del subapartado anterior y se comparan para mantener solo las gotas coincidentes.

La información de la posición en cada momento es usada para dibujar una trayectoria y la velocidad en cada dirección de cada gota es calculada usando esta información y dividiéndola entre el intervalo de tiempo:

$$U_i = \frac{X_{t_i} - X_{t_{i-1}}}{\Delta t} \quad (8)$$

Donde U_i es la velocidad de la gota entre imágenes, X_{t_i} y $X_{t_{i-1}}$ son las coordenadas en cada imagen y Δt es el tiempo entre imágenes ($6.6 \mu s$). La velocidad de la gota es estimada como la media de todos los valores obtenidos.

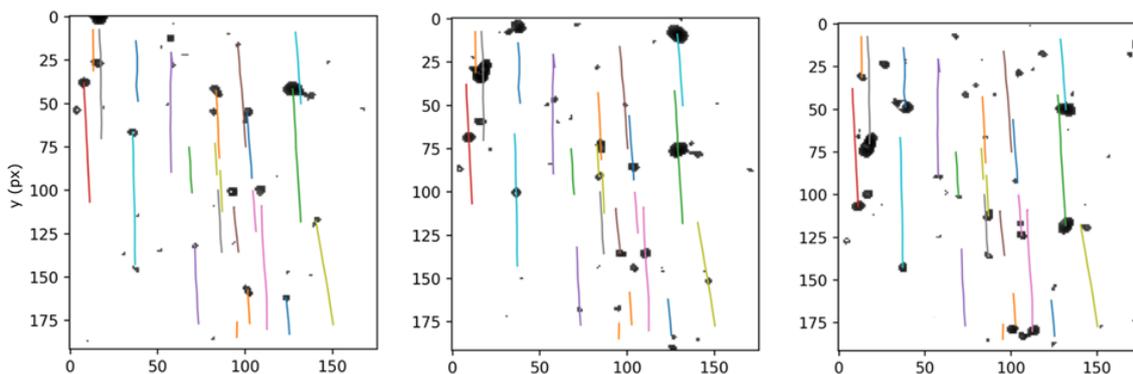


Figura 5.1.2. Simplificación del procesado de imágenes para la obtención de la velocidad

5.2. Resultados de Diámetro y Velocidad de las gotas

5.2.1. Efecto de la presión de inyección sobre el diámetro

Analizando las imágenes obtenidas, se puede ver que muchas de las gotas del chorro no son esféricas, sobre todo en la posición 1 (la más cercana al inyector). Esto es algo que ya se esperaba gracias a estudios anteriores y es por eso que, en la parte del procesado de las imágenes, se calculaba el área en vez del diámetro directamente. Con esta área, se utilizará la siguiente fórmula para determinar el diámetro equivalente de las gotas:

$$D_{eq} = \sqrt{\frac{4a}{\pi}} \quad (9)$$

Este método de calcular el diámetro de las gotas se aplicará para todas ellas ya que es muy difícil encontrar una gota que sea perfectamente esférica.

Una vez calculado el diámetro de las gotas podemos proceder a dibujar las gráficas, sin embargo, nos encontramos con un pequeño problema. La masa inyectada es directamente proporcional a la presión, por tanto, cuanto más aumentemos la presión de inyección más líquido se inyectará. De hecho, el número de gotas encontradas se ve incrementado aproximadamente en un 10% cuando aumentamos la presión de 4 a 6 bar y un 25% cuando pasamos de 6 a 8 bar. A raíz de esto, para poder realizar comparaciones, se han hecho distribuciones de probabilidad en todos los casos.

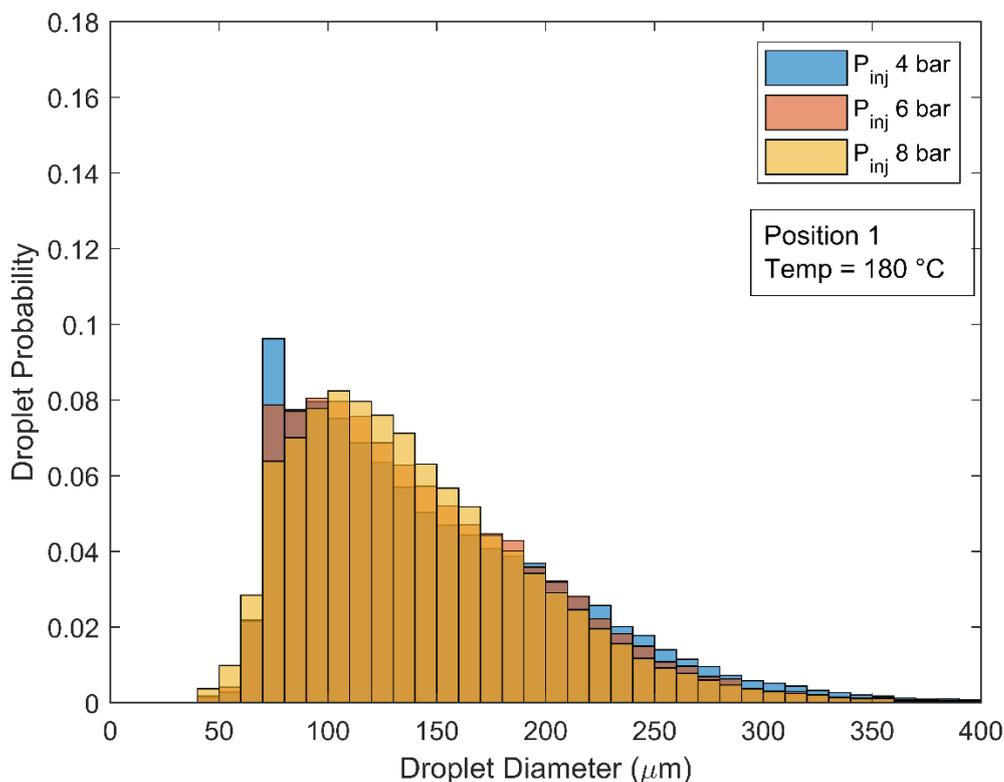


Figura 5.2.1. Distribución del Diámetro de las gotas a diferentes presiones en P1

En la figura 5.2.1 se puede ver un histograma en el que compara la distribución de probabilidad del diámetro de las gotas a distintas presiones (4, 6 y 8 bar), a una temperatura del aire constante (180°C) y en la posición 1 (4.6 mm del inyector). Aproximadamente, para los diámetros más pequeños, hasta 180 μm , parece que hay un mayor número de gotas cuanto mayor sea la presión de inyección, sin embargo, a partir de 200 μm la tendencia se invierte y aparecen más gotas cuanto menor sea la presión.

La figura 5.2.2 es el mismo tipo de gráfica que la figura anterior, pero, esta vez, la comparación del diámetro de las gotas a distintas presiones se hace en la posición 2 (a 35 mm del inyector). En esta posición podemos ver la misma relación entre el diámetro de las gotas y la presión de inyección que en la posición 1: cuanto más alta sea la presión de inyección, menor es el diámetro de las gotas y viceversa. Sin embargo, hay una clara diferencia, en esta gráfica es más probable encontrar gotas de menor tamaño que en la posición 1.

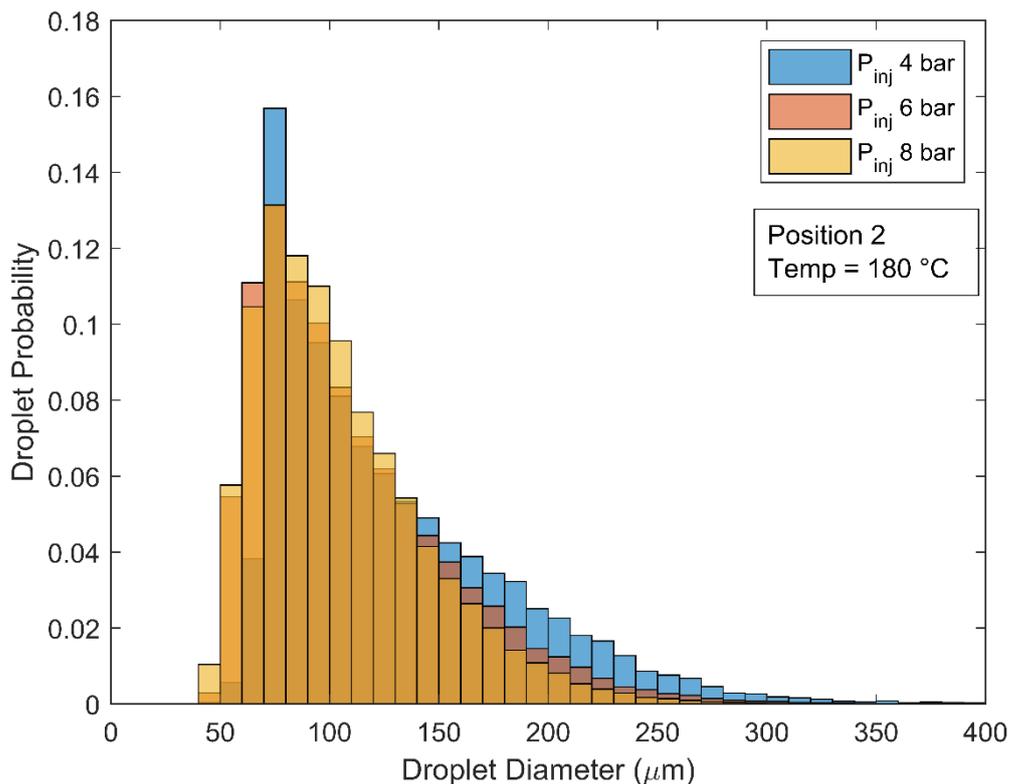


Figura 5.2.2 Distribución del Diámetro de las gotas a diferentes presiones en P2

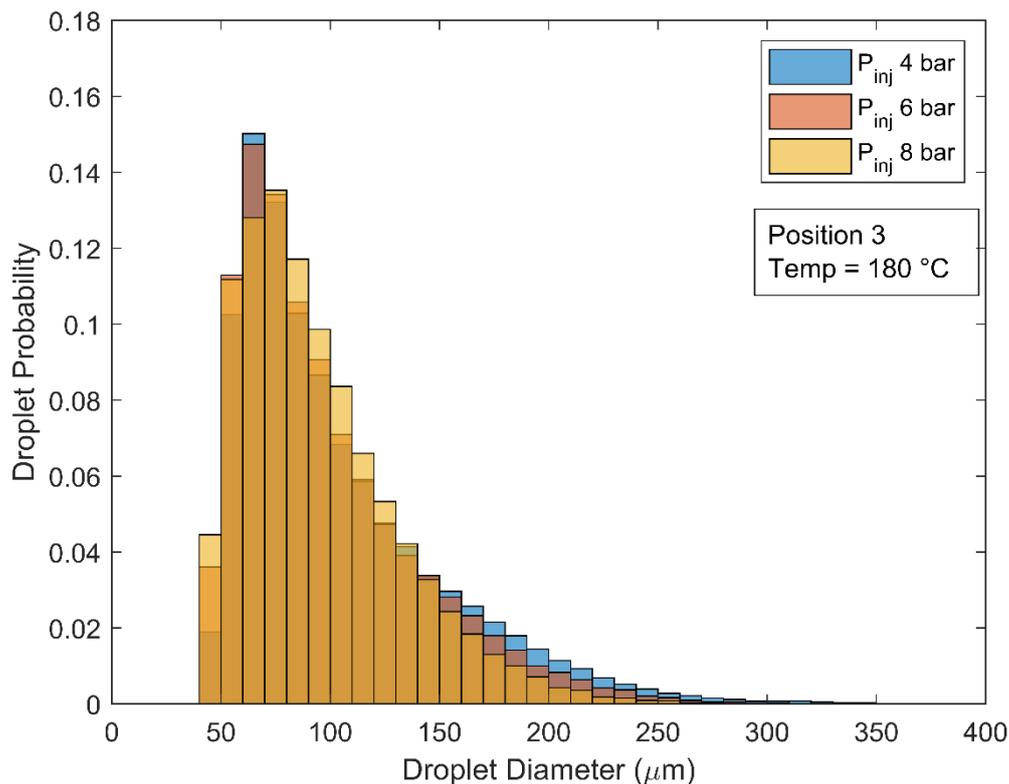


Figura 5.2.3 Distribución del Diámetro de las gotas a diferentes presiones en P3

Mismo tipo de gráfica que las figuras anteriores con la diferencia de que ahora la comparación se realiza en la posición 3 (a 35 mm del inyector y desplazado 7 mm del eje del chorro). Como podemos ver, las gráficas de las posiciones 2 y 3 son bastante similares salvo por la menor diferencia entre las distribuciones de las presiones.

5.2.2. Efecto de la presión de inyección sobre la velocidad del eje Y

Las figuras que aparecen en este subapartado representan la distribución de la velocidad de las gotas en el eje Y (dirección de la inyección) a una temperatura de aire constante de 180°C, a distintas presiones (4, 6 y 8 bar) y en tres posiciones distintas.

Antes de analizar las imágenes y dibujar las gráficas, cabe mencionar que un aumento de la presión de inyección conlleva a que el fluido obtenga más energía; por lo que la velocidad de las gotas se verá incrementada en el eje Y.

En la posición más cercana al inyector, la posición 1 (figura 5.2.4), se observa que un aumento de la presión conlleva a un aumento de la velocidad de las gotas y confirma la consideración previa. Por otra parte, parece que las distribuciones de velocidad se asemejan más a una distribución normal cuanto menos presión de inyección haya.

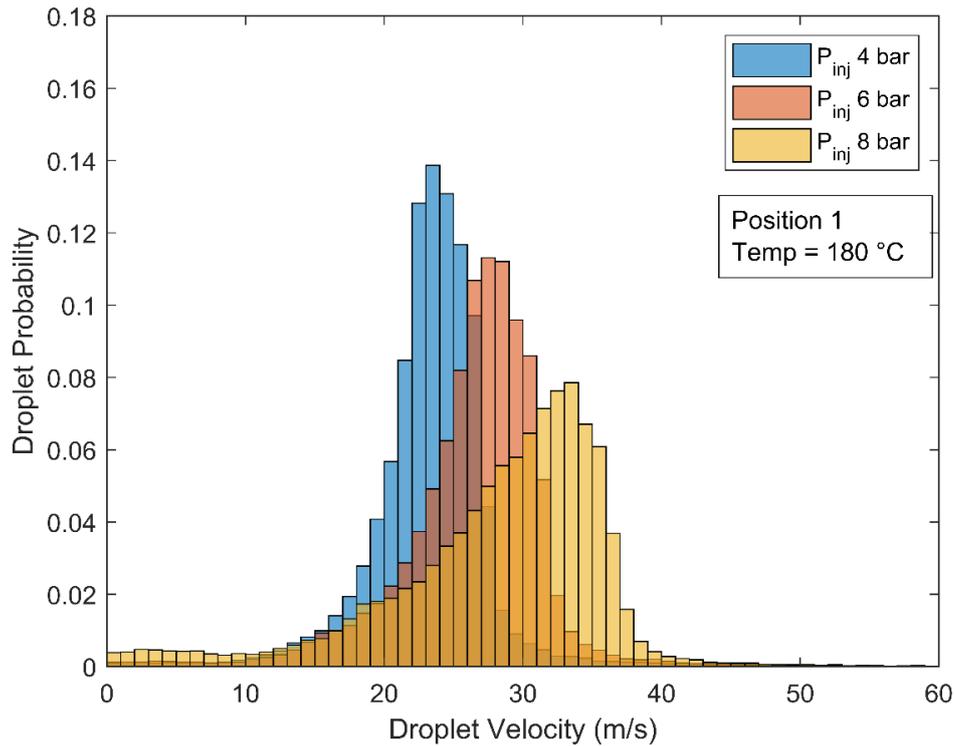


Figura 5.2.4. Distribución de la velocidad en el eje Y a distintas presiones en P1

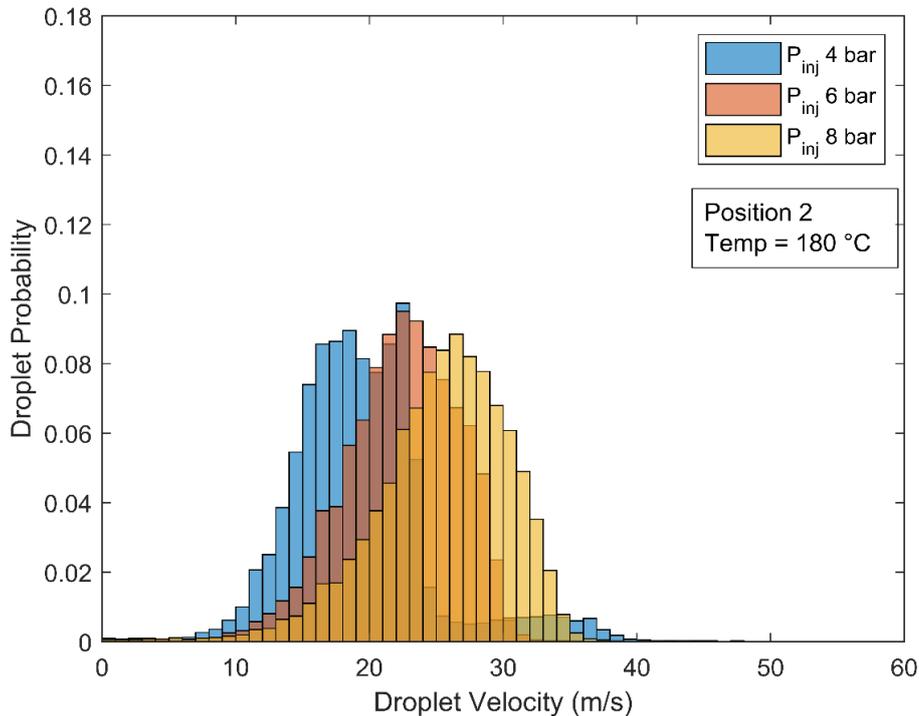


Figura 5.2.5. Distribución de la velocidad en el eje Y a distintas presiones en P2

En la posición 2 se vuelve a observar un aumento de la velocidad de las gotas al incrementar la presión de inyección; sin embargo, en esta posición (más alejada del inyector) la velocidad de las gotas disminuye respecto a la posición anterior (para la presión de 4 bar en la posición 1, la media era aproximadamente 23 m/s mientras que para la posición 2, 18 m/s).

En la posición 3, al igual que en las posiciones anteriores, se puede ver como un aumento de la presión de inyección genera un incremento en la velocidad de las gotas. En comparación con las anteriores gráficas, se puede observar que, en la posición 3, el rango de velocidades es más amplio para las tres presiones (hay más variedad de velocidades).

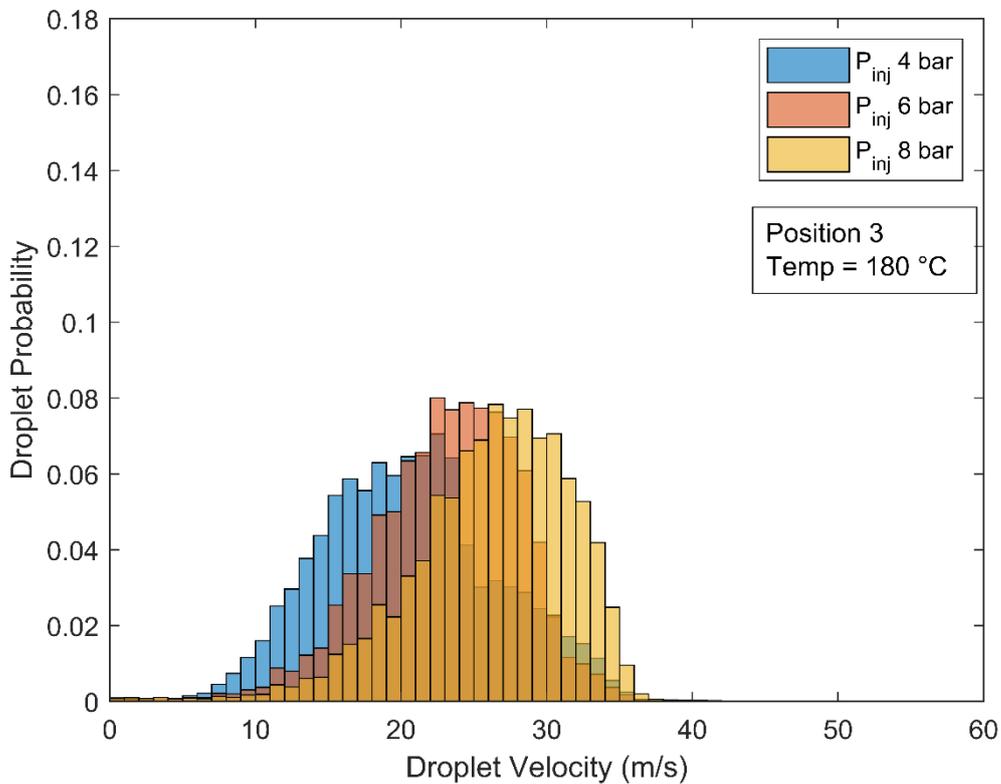


Figura 5.2.6. Distribución de la velocidad en el eje Y a distintas presiones en P3

5.2.3. Efecto de la presión de inyección sobre la velocidad del eje X

Las siguientes figuras representan la distribución de la velocidad de las gotas en el eje X a una temperatura de aire constante de 180°C, tres presiones distintas (4, 6 y 8 bar) y en 3 posiciones diferentes.

Esta componente de la velocidad aparece principalmente por el esparcimiento que ocurre en algunas de las gotas de urea al inyectar y, en menor medida, por el ligero desplazamiento al que se ven sometidas las gotas debido al flujo de aire. Como el esparcimiento que ocurre al inyectar se produce en ambos sentidos del eje X, en las siguientes distribuciones aparecerán gotas que poseen una velocidad negativa.

La figura 5.2.7 muestra la distribución de velocidades en la posición 1 donde las tres distribuciones son bastante similares, pero parece que el rango de velocidades es más amplio cuanto más alta sea la presión de inyección (más variedad de velocidades).

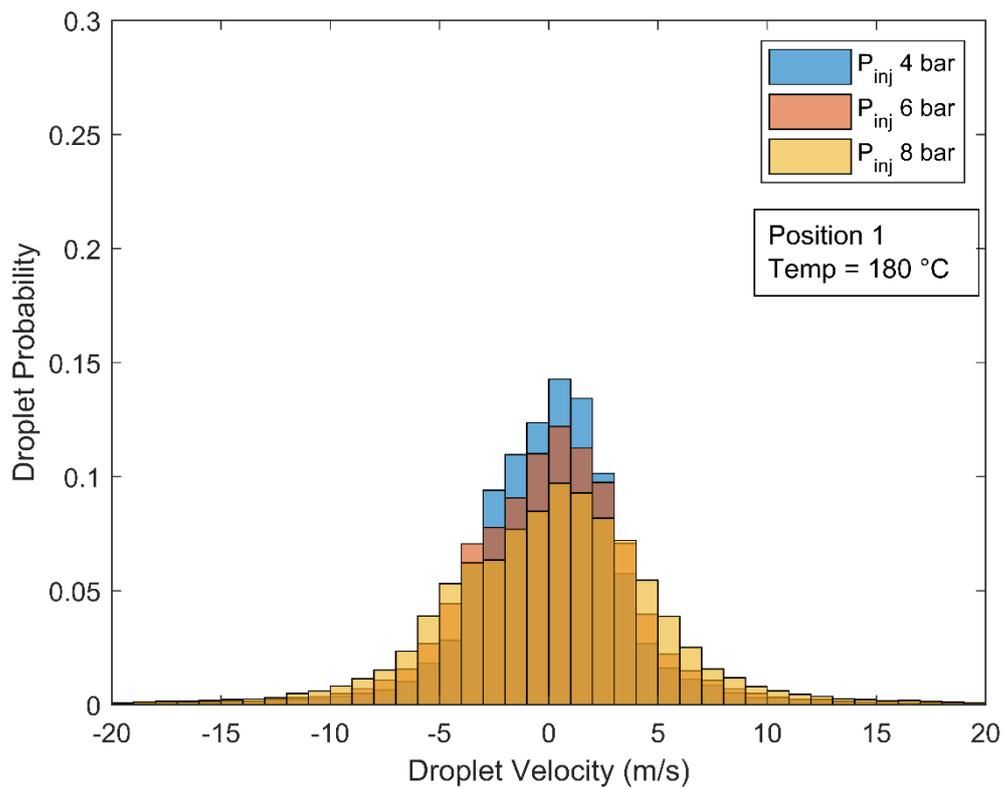


Figura 5.2.7. Distribución de la velocidad en el eje X a distintas presiones en P1

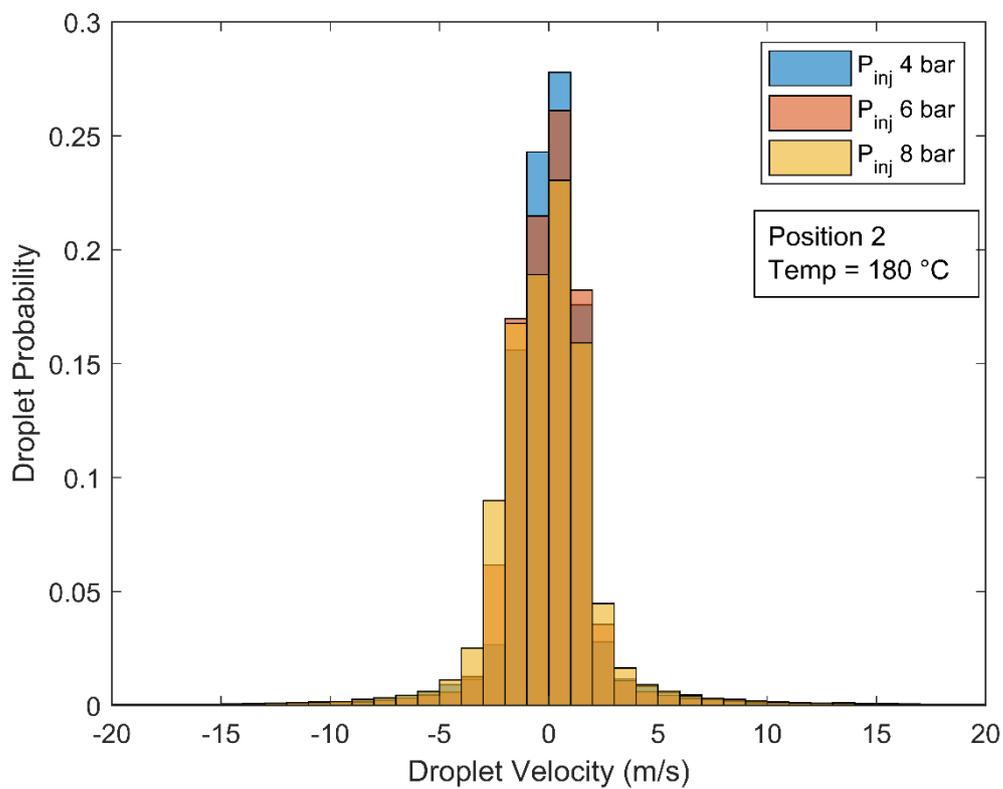


Figura 5.2.8. Distribución de la velocidad en el eje X a distintas presiones en P2

En la posición 2 (figura 5.2.8), las distribuciones de las distintas presiones vuelven a ser bastantes similares entre sí, pero al comparar esta gráfica con la anterior se ve que en la posición 2 solo algunas gotas poseen una velocidad considerable. Esto se debe a que en posiciones alejadas del inyector solo se observan aquellas gotas que su movimiento ha sido prácticamente recto desde la inyección.

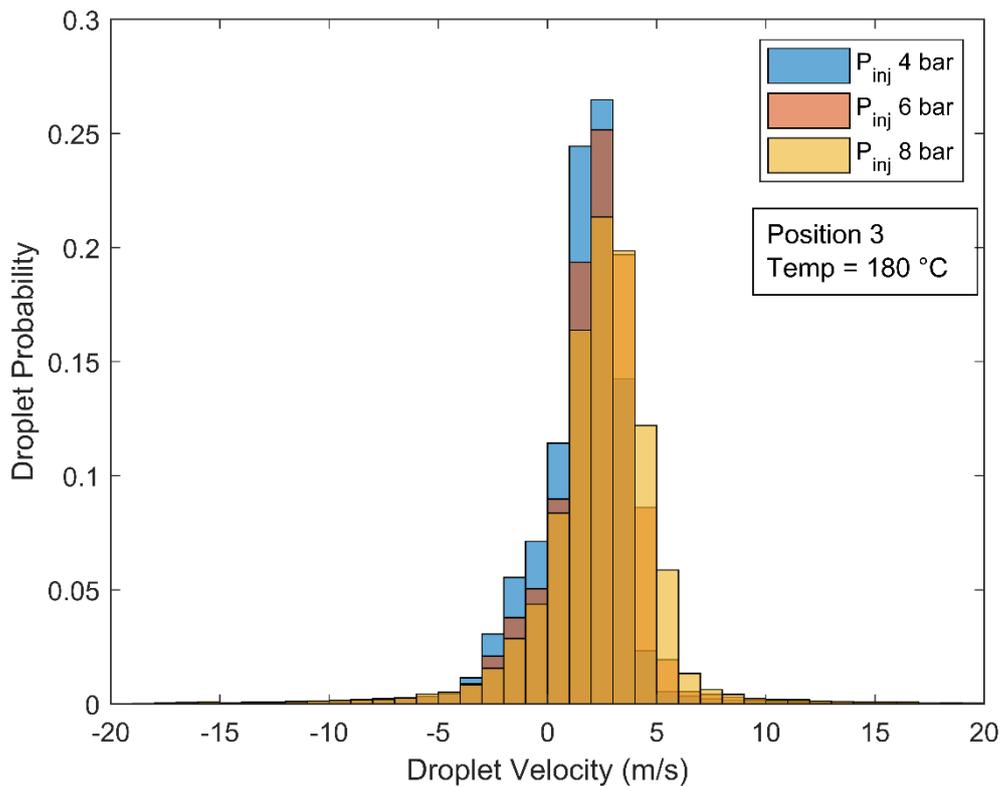


Figura 5.2.9. Distribución de la velocidad en el eje X a distintas presiones en P3

Las distribuciones de la velocidad de las gotas en la posición 3 se muestran en la figura 5.2.9 y podemos observar que presentan una forma similar a la de la posición 2; aunque estas gotas presentan velocidades mayores que en las gráficas anteriores (distribuciones desplazadas hacia la derecha). Esto ocurre porque, mientras que la posición 2 solo capta las gotas en la zona central del chorro, la posición 3 capta las gotas más cercanas al límite y estas gotas, debido al esparcimiento inicial de la inyección, tiene una velocidad sobre el eje X elevada. El amplio rango de velocidades que se veía en la posición 1 es debido a que esta capta tanto las gotas que se han desviado del eje de la inyección como las que no.

5.2.4. Efecto de la temperatura del flujo de aire sobre el diámetro

En esta parte se van a comentar los resultados referentes al efecto que produce la temperatura del flujo del aire sobre el diámetro de las gotas. Cabe destacar que se esperaba que un aumento de la temperatura del flujo de aire generara una disminución en el diámetro de las gotas debido a la mayor evaporación de las gotas resultante.

Sin embargo y como se puede ver en las figuras 5.2.10 y 5.2.11, no se observa una clara dependencia del diámetro de las gotas con la temperatura del flujo de aire.

Como lo más lógico sería esperar una disminución del diámetro de las gotas con el aumento de la temperatura del flujo de aire, no sacaremos conclusiones precipitadas y esta parte se volverá a repetir en posteriores estudios.

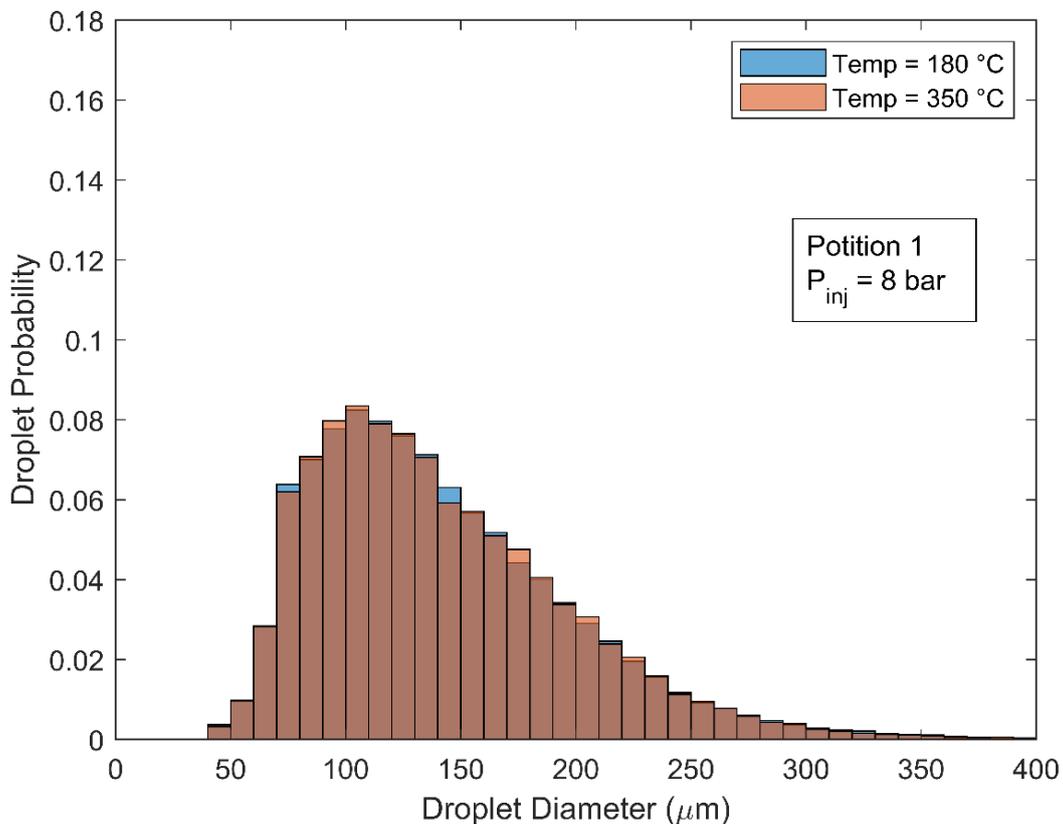


Figura 5.2.10. Distribución del diámetro de las gotas a dos temperaturas distintas en P1

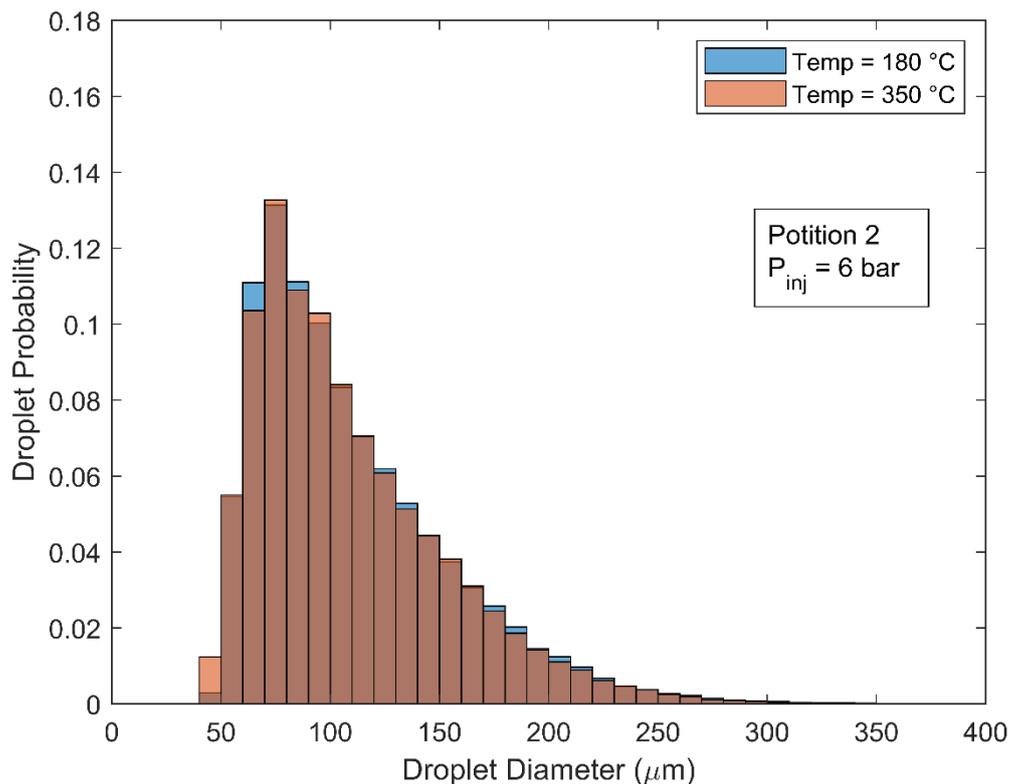


Figura 5.2.11. Distribución del diámetro de las gotas a dos temperaturas distintas en P2

5.2.5. Efecto de la temperatura del flujo de aire sobre la velocidad

Por último, este subapartado alberga los resultados referentes al efecto que tiene la temperatura del flujo del aire sobre la velocidad tanto del eje X como del eje Y. En este tipo de gráficas podremos ver como aumenta ligeramente la velocidad de las gotas en ambos ejes. Esto se debe a que un aumento en la temperatura del aire conlleva a que se reduzca su densidad y como nosotros mantenemos el gasto de aire constante (40 kg/h), según la ecuación 10, la velocidad debe aumentar ya que el área también es constante.

$$\dot{m} = \rho * v * A \quad (10)$$

A raíz de este aumento de la velocidad del aire, las gotas ven aumentada su velocidad en el eje X, ya que el aire “empuja” las gotas en el sentido positivo del eje. Además, el descenso de la densidad del aire afecta también a su viscosidad facilitando la penetración de las gotas, lo que conlleva a aumentar la velocidad de las gotas en el eje Y.

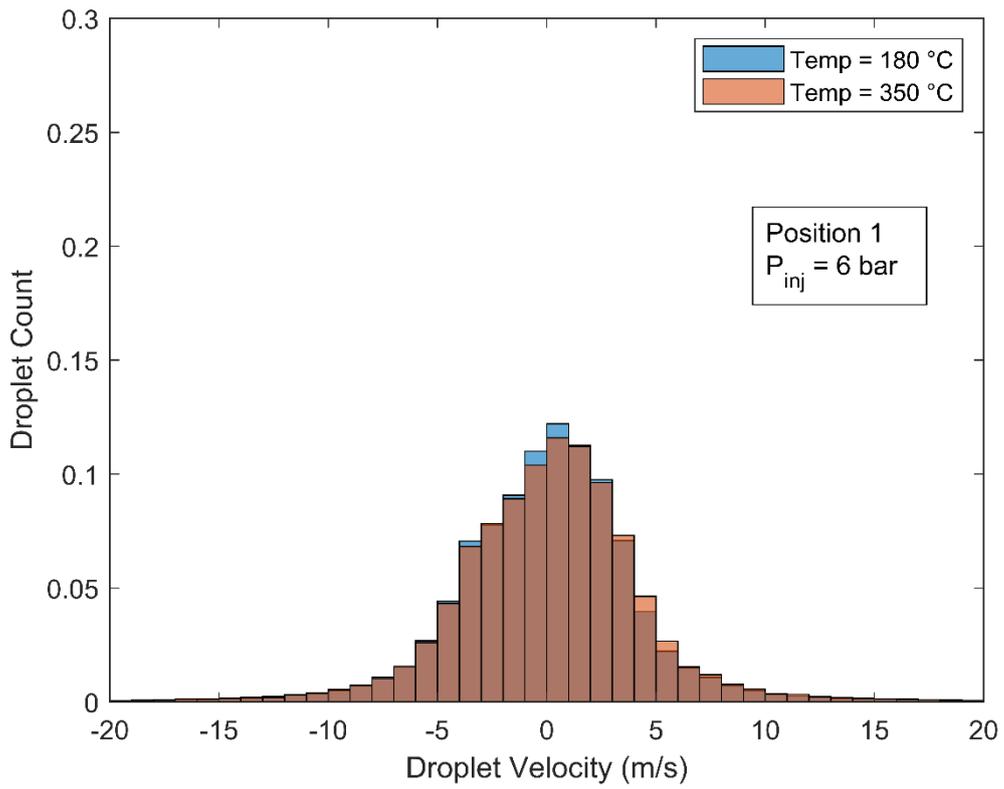


Figura 5.2.12. Distribución de la velocidad en el eje X a distintas temperaturas en P1

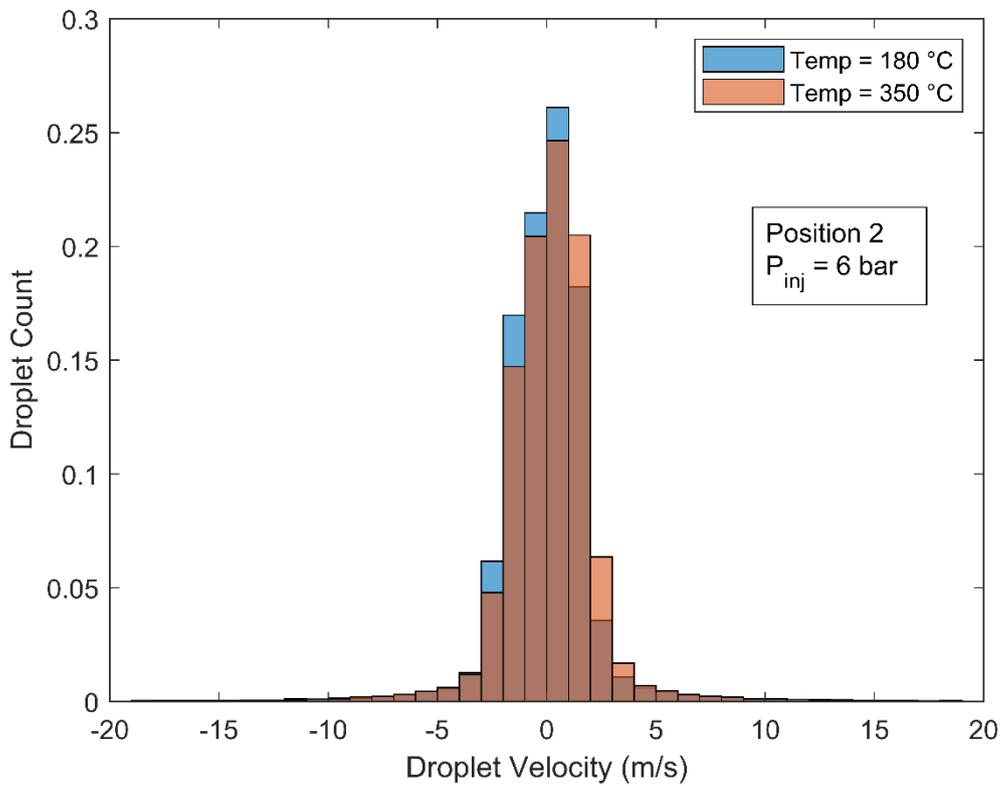


Figura 5.2.13. Distribución de la velocidad en el eje X a distintas temperaturas en P2

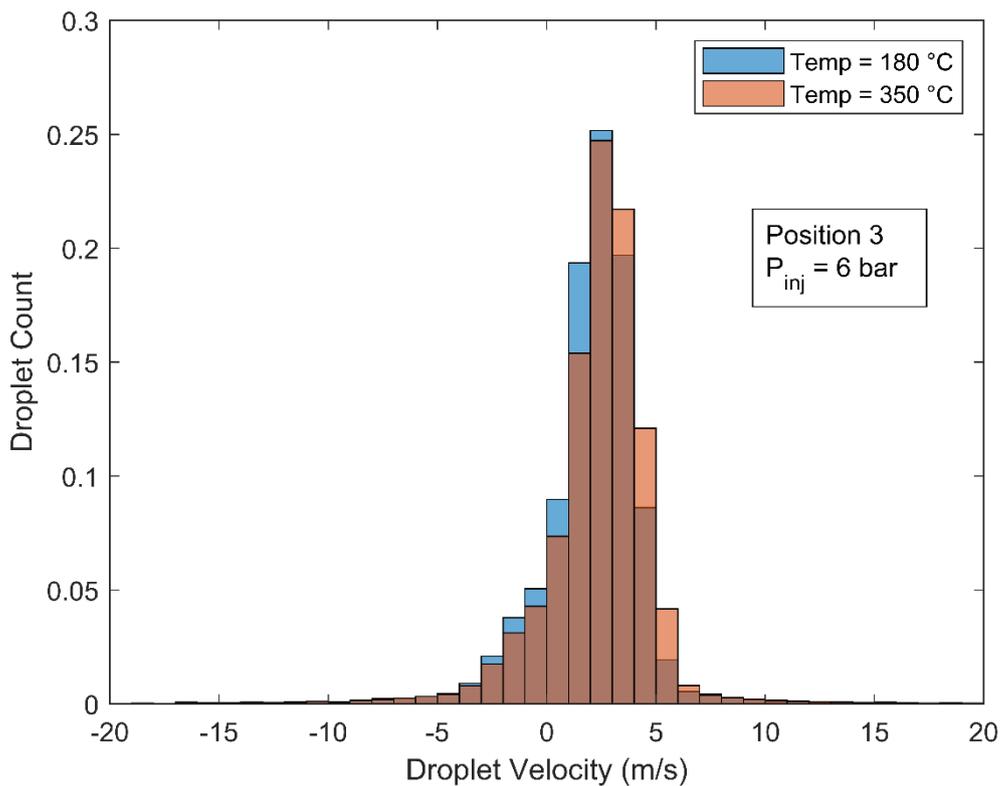


Figura 5.2.14. Distribución de la velocidad en el eje X a distintas temperaturas en P3

Las figuras 5.2.12, 5.2.13 y 5.2.14 representan las distribuciones de velocidad de las gotas del eje X en las posiciones 1, 2 y 3 respectivamente y en ellas se puede ver ese ligero aumento de la velocidad ya comentado. También se puede observar que la forma y el rango de valores de ambas temperaturas son muy similares en todas las gráficas.

Las siguientes gráficas representan las distribuciones de velocidad de las gotas del eje Y en las posiciones 1, 2 y 3 respectivamente y aquí se vuelve a ver lo mismo que en las gráficas de la velocidad del eje X: un ligero aumento de la velocidad de gotas y ambas distribuciones de temperatura son similares en todas las gráficas.

El resto de las gráficas obtenidas en todos los apartados se pueden ver en el anexo Y.

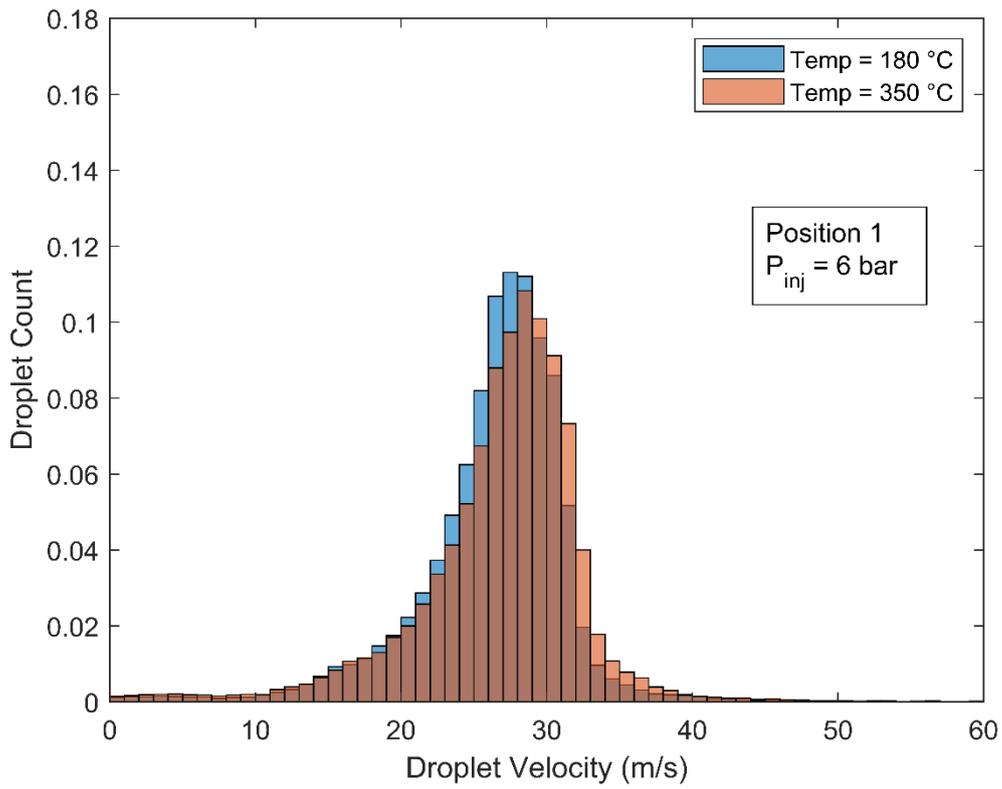


Figura 5.2.15. Distribución de la velocidad en el eje Y a distintas temperaturas en P1

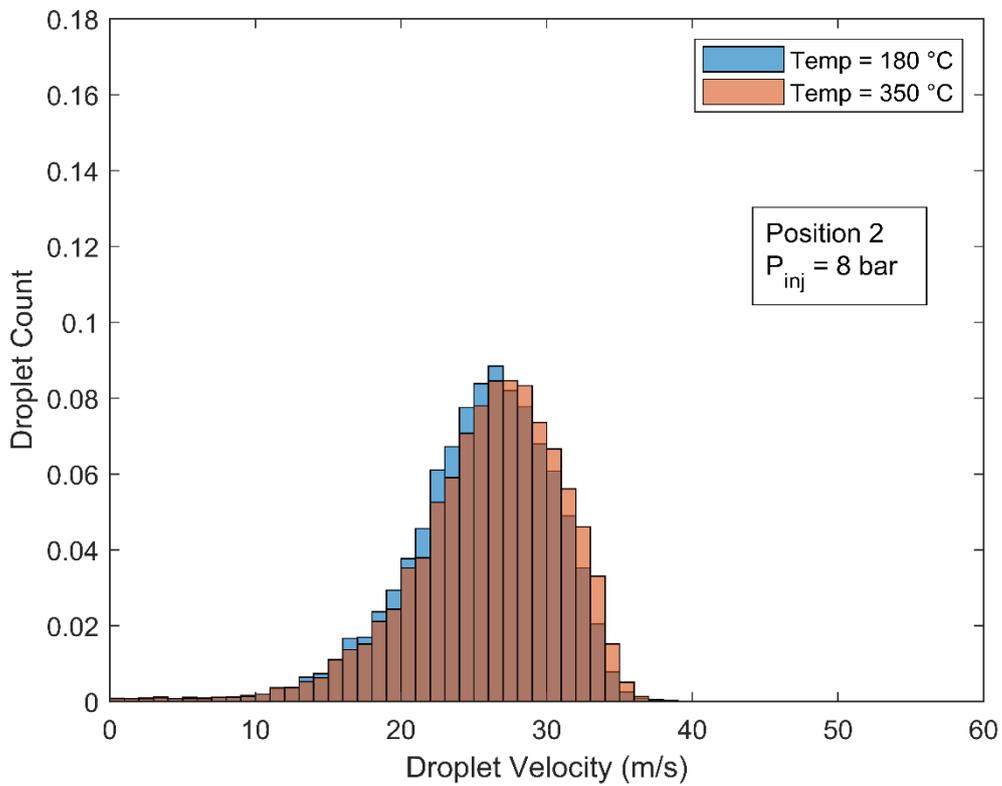


Figura 5.2.16. Distribución de la velocidad en el eje Y a distintas temperaturas en P2

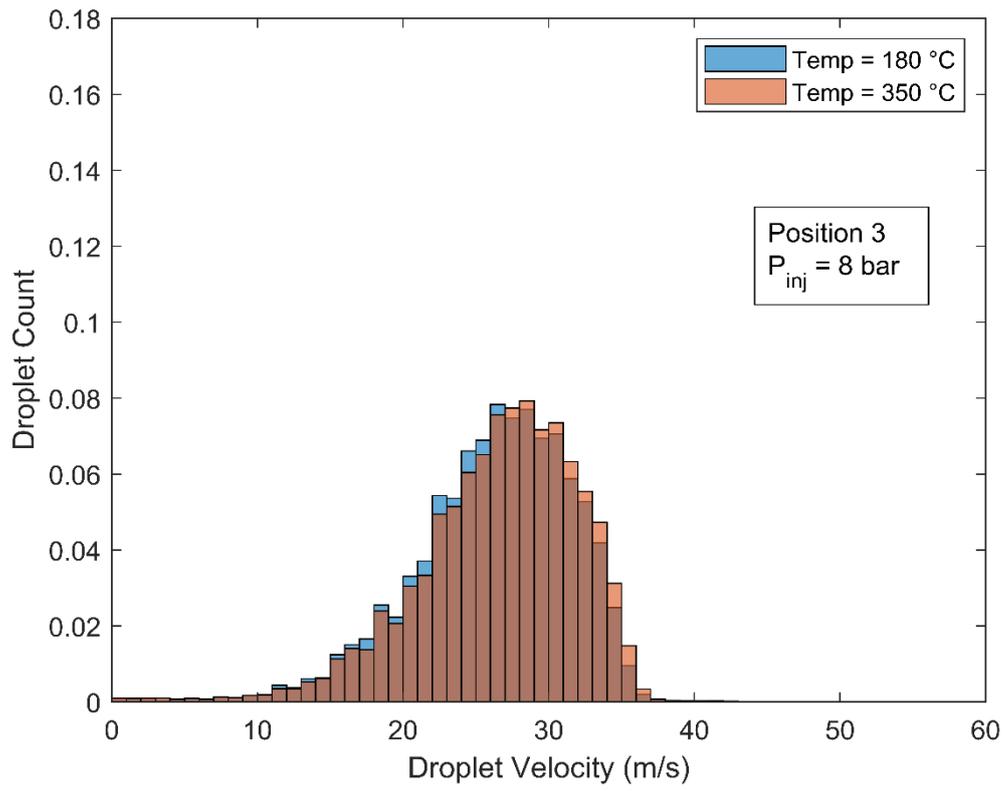


Figura 5.2.17. Distribución de la velocidad en el eje Y a distintas temperaturas en P3

6. Conclusiones

6.1. Conclusiones

Después de analizar detalladamente las gráficas obtenidas, se han sacado en claro una serie de conclusiones de gran importancia.

Tanto el diámetro como la velocidad de las gotas que se ven considerablemente afectados por la presión de inyección. Un aumento de la presión de inyección del chorro agua-urea conlleva a una reducción del diámetro de las gotas, sin embargo, la componente de la velocidad del eje Y es directamente proporcional a la presión (a más presión de inyección, más velocidad). Además, el rango de velocidades, tanto del eje Y como del eje X, también aumenta al incrementar la presión de inyección (más variedad de velocidades).

Con respecto a la temperatura del flujo de aire, no se han sacado conclusiones definitivas en su relación con el diámetro de las gotas, pero sí que se han obtenido con la velocidad. Al incrementar la temperatura del flujo de aire, aumentan ambas componentes de la velocidad.

En cuanto a las distintas posiciones estudiadas del chorro, las características de este cambian considerablemente dependiendo de que posición se estudie. En las posiciones más cercanas al inyector, las gotas tienen formas más irregulares que en las posiciones alejadas donde son más esféricas y esto conlleva a que, en general, el diámetro de las gotas sea más pequeño cuanto más alejadas se encuentren del inyector. La distancia a la que se encuentren las gotas del inyector también afecta a su velocidad, la componente del eje Y de la velocidad se va reduciendo conforme se van alejando las gotas del inyector. Además, el hecho de encontrarse en zonas centrales del chorro (P2) o en zonas cercanas a los límites (P3), influye bastante en ambas componentes de la velocidad. En zonas cercanas a los límites del chorro, el rango de velocidades del eje Y es más amplio y la componente del eje X de la velocidad aumenta bastante respecto a los valores en zonas centrales.

6.2. Trabajos futuros

En relación a futuros trabajos a realizar, utilizando esta misma instalación se pueden repetir algunos ensayos para poder obtener una conclusión definitiva sobre la relación que existe entre la temperatura del flujo de aire y el diámetro de las gotas. También se pueden observar las propiedades del chorro en posiciones diferentes a las estudiadas en este proyecto.

Otro posible trabajo sería repetir los ensayos realizados en este proyecto, pero cambiando la inclinación del inyector (además de la inclinación de 90° que se ha utilizado, el portainyector de la maqueta de visualización permite una inclinación de 45°).

Además, cambiando ciertas partes de la instalación, se pueden estudiar cómo afectan otros parámetros a las características del chorro o cómo se comporta el chorro utilizando inyectores diferentes.

7. Bibliografía

[1] Jose Pérez Rodrigo. “Estudio experimental de la inyección de urea en condiciones de motor de combustión”. Trabajo Final de Grado. Universidad Politécnica de Valencia. 2018

[2] Salvador Griñán Egea. “Diseño de una instalación experimental para el estudio de la inyección de urea en condiciones de gases de escape de un motor de combustión”. Trabajo Final de Grado. Universidad Politécnica de Valencia. 2017

[3] Asignatura ‘Combustión’ del grado de ingeniería mecánica de la UPV. Tema 8: ‘Emisiones contaminantes’

[4] Asignatura ‘Motores alternativos’ del master ‘Motores de combustión interna alternativos’ de la UPV. Tema 16: ‘Técnicas para reducir las emisiones. Normativas’

[5] Página web. Motor Diésel, limitador de humos. URL:
<https://www.monografias.com/trabajos104/motor-diesel/motor-diesel4.shtml>

[6] Página web. El LNT, el hermano pequeño del sistema SCR. URL:
https://www.infotaller.tv/electromecanica/LNT-hermano-pequeno-sistema-SCR_0_1008199180.html

[7] Página web. Sistemas anticontaminación, Filtro de partículas. URL:
<http://www.aficionadosalamecanica.net/filtro-de-particulas-sin.htm>

[8] Página web. Tecnologías para la reducción de NO_x. URL:
<https://espanol.lubrizol.com/Lubricant-and-Fuel-Additives/Engine-Oil-Additives/ACEA/Reference-Material/Engine-and-Aftertreatment-Technologies>

[9] Página web. Normativa EURO, la normativa europea sobre emisiones. URL:
<https://www.grupomontalt.com/normativa-europea-de-emisiones-euro/>

[10] Página web. Evolución de la normativa EURO. URL:
https://es.wikipedia.org/wiki/Normativa_europea_sobre_emisiones

[11] F.Payri, J.M^a.Desantes y José M^a García Oliver. “El proceso de combustión turbulenta de chorros diésel de inyección directa”. Pág. 68.

[12] Raul Payri, Gabriela Bracho, Jaime Gimeno y Armando Moreno.
“Investigation of the Urea-Water Solution Atomization Process in Engine Exhaust-Like Conditions”.

[13] Página web. Lentes de Fresnel. URL:
<http://teleformacion.edu.aytolacoruna.es/FISICA/document/fisicaInteractiva/OptGeometrica/Instrumentos/fresnel/fresnel.htm>

Parte II

Presupuesto

8. Presupuesto

8.1. Introducción

En esta parte del trabajo se detallarán los costes para llevar a cabo el proyecto “Análisis del proceso de inyección de urea a partir de técnicas ópticas en condiciones de escape de un motor”.

Se dividirán los costes según su naturaleza, es decir, se describirá, por una parte, los gastos en mano de obra, después, los costes de los nuevos materiales, el coste de la utilización de los equipos, etc.

Por último, cabe destacar de que la gran mayoría de los componentes de la instalación experimental ya fueron adquiridos anteriormente o fabricados para otros proyectos; por lo que, para estos elementos, solo habrá que considerar los costes de las amortizaciones.

8.2. Costes de la mano de obra

Aquí se recogen los gastos relacionados con la mano de obra requerida para la realización de este proyecto. Como se muestra en la figura 8.1, en este caso se ha contado con la participación de un ingeniero superior (alumno de doctorado), un ingeniero coordinador del proyecto (doctora por la UPV), un técnico de laboratorio y un ingeniero en formación.

| Trabajador | Precio unitario (€/h) | Cantidad | Unidad | Total (€) |
|----------------------------------|------------------------------|-----------------|---------------|------------------|
| <i>Ing. en formación</i> | 18.90 | 300 | horas | 5670.00 |
| <i>Ingeniero superior</i> | 35.00 | 180 | horas | 6300.00 |
| <i>Ing. Coordinador proyecto</i> | 47.50 | 75 | horas | 3562.50 |
| <i>Técnico laboratorio</i> | 20.35 | 40 | horas | 814.00 |
| <i>Subtotal mano de obra</i> | | | | 16346.50 |

Figura 8.1. Tabla de costes de mano de obra

8.3. Costes de nuevos componentes

Como se ha comentado a lo largo de este trabajo, para este proyecto se han requerido muy pocos elementos nuevos. Estos han sido el carrito, el soporte y la pequeña modificación en las bridas de entrada y salida de la maqueta de visualización que se incluirán en esta parte del presupuesto. El coste de estos componentes se muestra en la figura 8.2.

| Elemento | Precio unitario (€) | Cantidad | Precio total (€) |
|------------------------------------|----------------------------|-----------------|-------------------------|
| <i>Carrito</i> | 310.10 | 1 | 310.10 |
| <i>Soporte</i> | 102.30 | 1 | 102.30 |
| <i>Modificación bridas</i> | 31.15 | 2 | 62.30 |
| Subtotal nuevos componentes | | | 474.70 |

Figura 8.2. Tabla de costes de nuevos componentes

8.4. Amortizaciones

La gran mayoría de la instalación experimental ya fue adquirida o fabricada anteriormente; por lo que todos estos componentes no suponen un gasto para el proyecto. Sin embargo, sí que hay que considerar sus amortizaciones durante el tiempo de realización del proyecto, tal como se muestra en la figura 8.3. Para llevar a cabo la amortización se considerará un tiempo máximo de funcionamiento de 40 horas semanales y 46 semanas al año.

| Elemento | Coste (€) | Vida útil (años) | Amortización unitaria (€) | Cantidad | Unidad | Total (€) |
|----------------------------------|------------------|-------------------------|----------------------------------|-----------------|---------------|------------------|
| <i>Instalación flujo de aire</i> | 5770.50 | 10 | 0.31 | 120 | horas | 37.20 |
| <i>Cámara de visualización</i> | 4864.00 | 10 | 0.26 | 120 | horas | 31.20 |
| <i>Cámara Photron</i> | 35000.00 | 20 | 0.95 | 120 | horas | 114.00 |
| <i>Osciloscopio Yokogawa</i> | 12000.00 | 10 | 0.65 | 120 | horas | 78.00 |
| <i>Termo-regulador</i> | 2300.00 | 10 | 0.13 | 120 | horas | 15.60 |
| <i>Generador de señales</i> | 523.00 | 5 | 0.06 | 120 | horas | 7.20 |
| <i>Ordenador Genotec</i> | 800.00 | 5 | 0.09 | 280 | horas | 25.20 |
| <i>Genotec</i> | 6540.00 | 10 | 0.36 | 120 | horas | 43.20 |
| Subtotal amortizaciones | | | | | | 351.60 |

Figura 8.3. Tabla de amortizaciones

8.5. Coste de la utilización de los equipos

En este punto se recogen los gastos derivados de la utilización de los equipos de la instalación experimental a la hora de realizar los ensayos. Estos gastos corresponden, principalmente, al consumo eléctrico de los equipos pero también aparecen otros elementos como el Adblue o el líquido refrigerante. En las figuras 8.4 y 8.5 se muestran los costes del consumo eléctrico y de otros elementos respectivamente. Cabe destacar que para el cálculo del consumo eléctrico se considera un precio de 0.11 €/kWh y un rendimiento de los equipos que representa el porcentaje medio al que se exige a cada uno de los componentes frene a su máxima capacidad durante todo el proyecto.

| Elemento | Potencia (kW) | Rendimiento | Cantidad (h) | Consumo eléctrico (€) |
|-----------------------------------|----------------------|--------------------|---------------------|------------------------------|
| <i>Soplador</i> | 2.2 | 20% | 120 | 5.80 |
| <i>Resistencia</i> | 15.0 | 75% | 120 | 148.50 |
| <i>Ordenador</i> | 0.5 | 100% | 280 | 15.40 |
| <i>Equipos auxiliares</i> | 10.0 | 100% | 120 | 132.00 |
| <i>Subtotal consumo eléctrico</i> | | | | 301.70 |

Figura 8.4. Tabla de costes de consumo eléctrico

| Elemento | Precio unitario (€) | Cantidad (litros) | Precio total (€) |
|-----------------------------------|----------------------------|--------------------------|-------------------------|
| <i>Adblue</i> | 14.25 | 6 | 85.50 |
| <i>Líquido refrigerante</i> | 6.80 | 12 | 81.60 |
| <i>Subtotal otros consumibles</i> | | | 167.10 |

Figura 8.5. Tabla de costes de otros consumibles

8.6. Costes del Software

Por último, hay que añadir los costes referentes a los programas informáticos utilizados. Algunas de las licencias de estos programas, como el de la cámara, no se incluyen en este apartado porque ya venían con la adquisición del propio producto. Además, las licencias de los programas mostrados en la figura 8.6 no se han obtenido expresamente para este proyecto, sino que ya fueron adquiridas por el CMT, pero se ha indicado el precio anual de dichas licencias para tenerlo en cuenta en el presupuesto.

| Programa | Precio licencia (€) |
|---------------------------------|----------------------------|
| <i>Microsoft Office</i> | 70.00 |
| <i>Matlab</i> | 800.00 |
| <i>Solidworks</i> | 1500.00 |
| <i>Subtotal costes Software</i> | 2370.00 |

Figura 8.6. Tabla de costes del Software

8.7. Resumen del presupuesto

En la figura 8.7 se recopilan todos los gastos y se muestra el coste total del proyecto después de añadir los gastos generales (costes relacionados con imprevistos, sobrecargos...) y aplicar el IVA solo a la mano de obra, ya que el resto de gastos ya lo tienen incluido.

| Tipo | Costes (€) |
|---------------------------------|-------------------|
| <i>Mano de obra</i> | 16346.50 |
| <i>Nuevos componentes</i> | 474.70 |
| <i>Amortizaciones</i> | 351.60 |
| <i>Consumo eléctrico</i> | 301.70 |
| <i>Otros consumibles</i> | 167.10 |
| <i>Software</i> | 2370.00 |
| <i>Subtotal</i> | 20011.60 |
| <i>Gastos generales (13%)</i> | 2601.50 |
| <i>IVA (21%)</i> | 3432.80 |
| <i>Presupuesto Total</i> | 26045.90 |

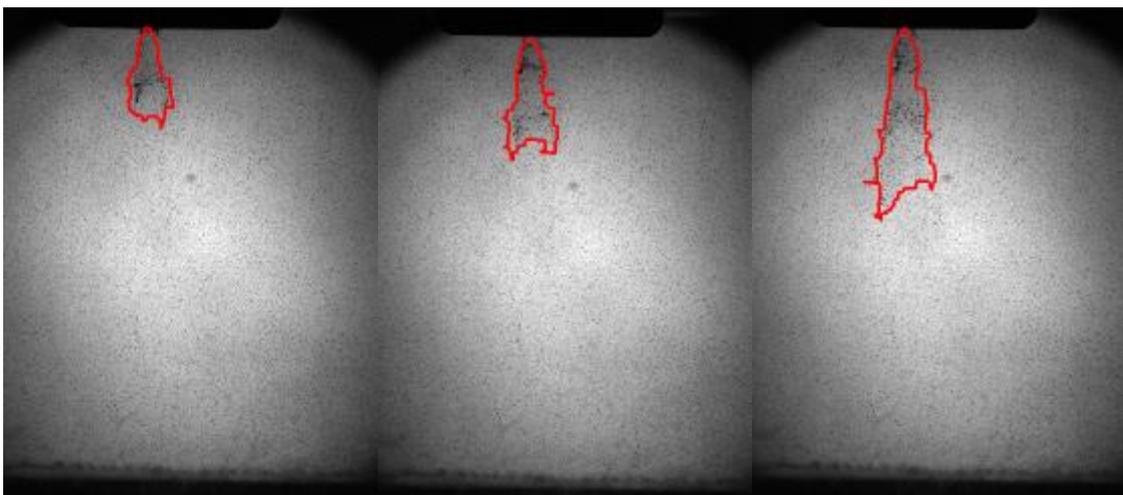
Figura 8.7. Resumen y presupuesto total

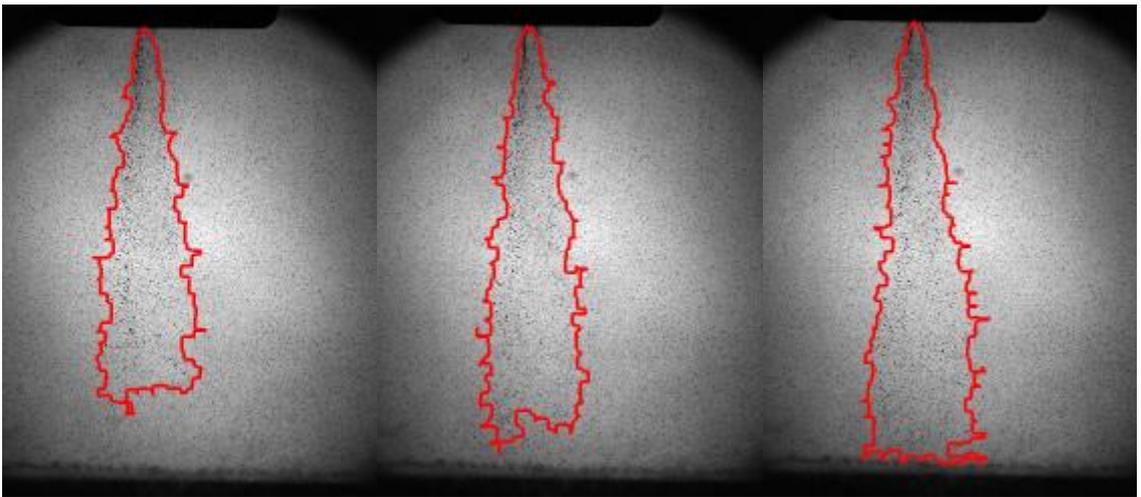
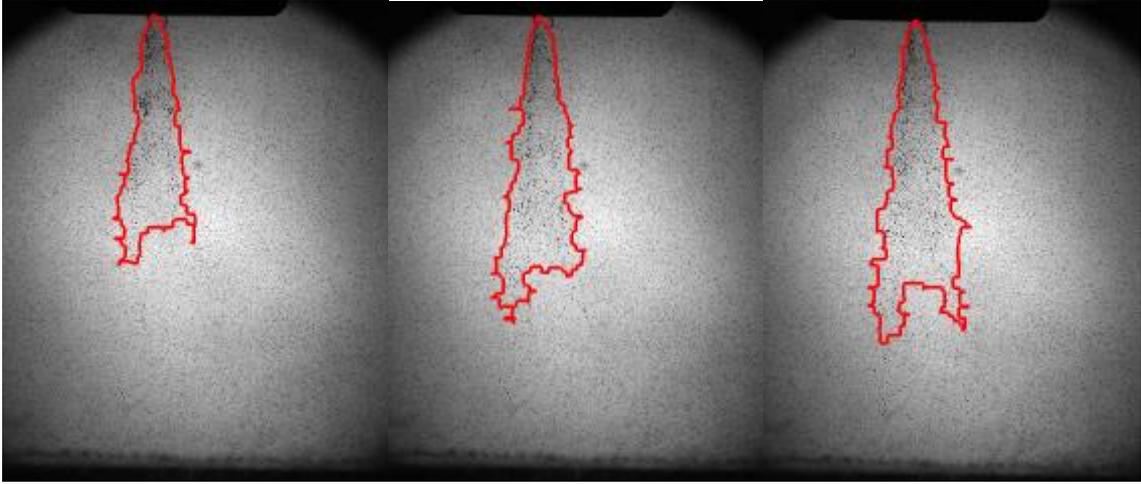
Parte III

Anexos

Anexo 1: Imágenes de la inyección del chorro agua-urea

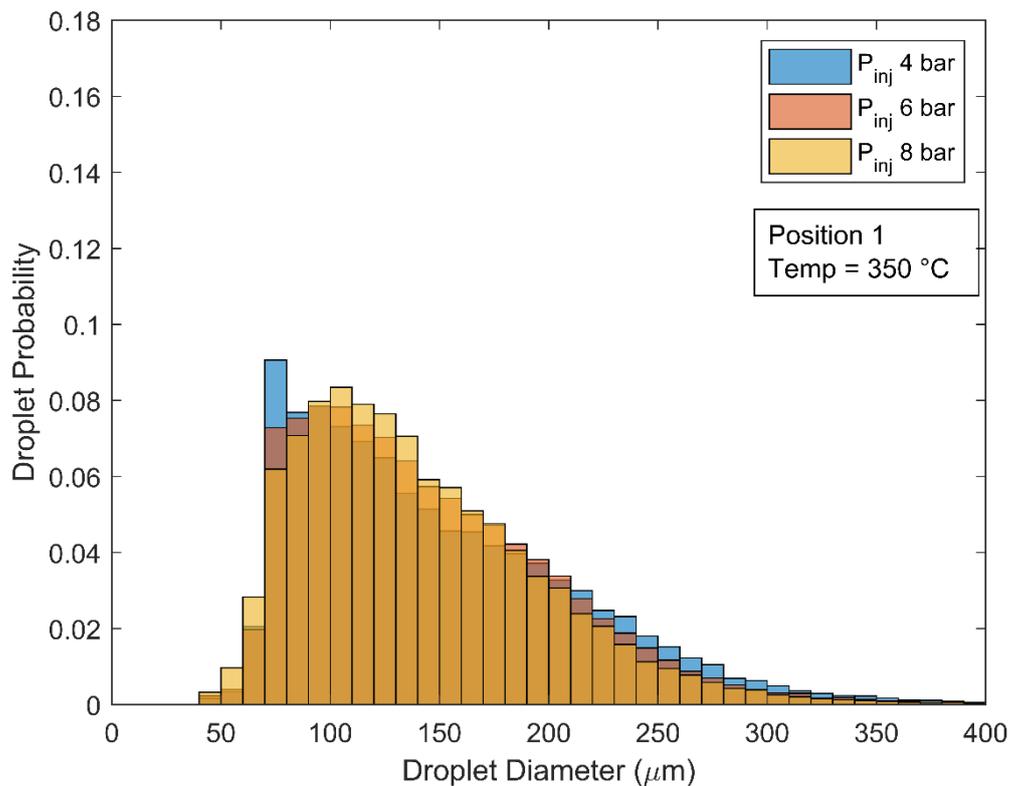
En este anexo se adjuntarán varias imágenes obtenidas del chorro agua-urea parecidas a la figura 4.10 pero solo mostrando el contorno del chorro. De esta forma, se podrá apreciar la evolución de las gotas a lo largo de la inyección.

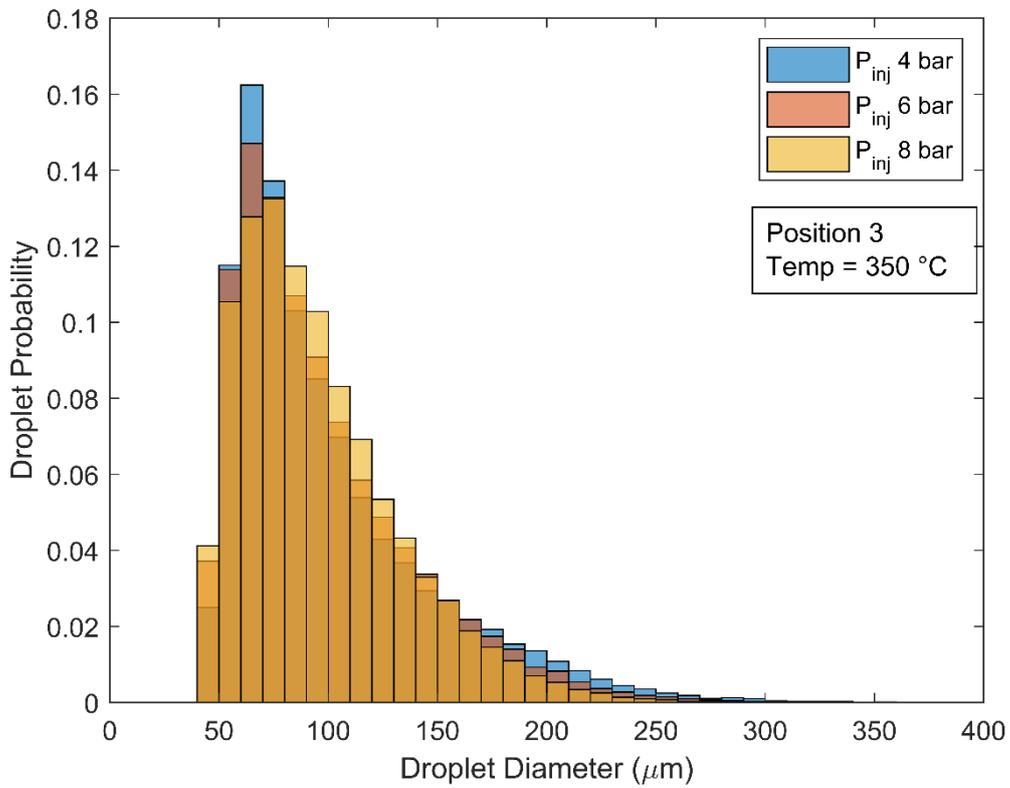
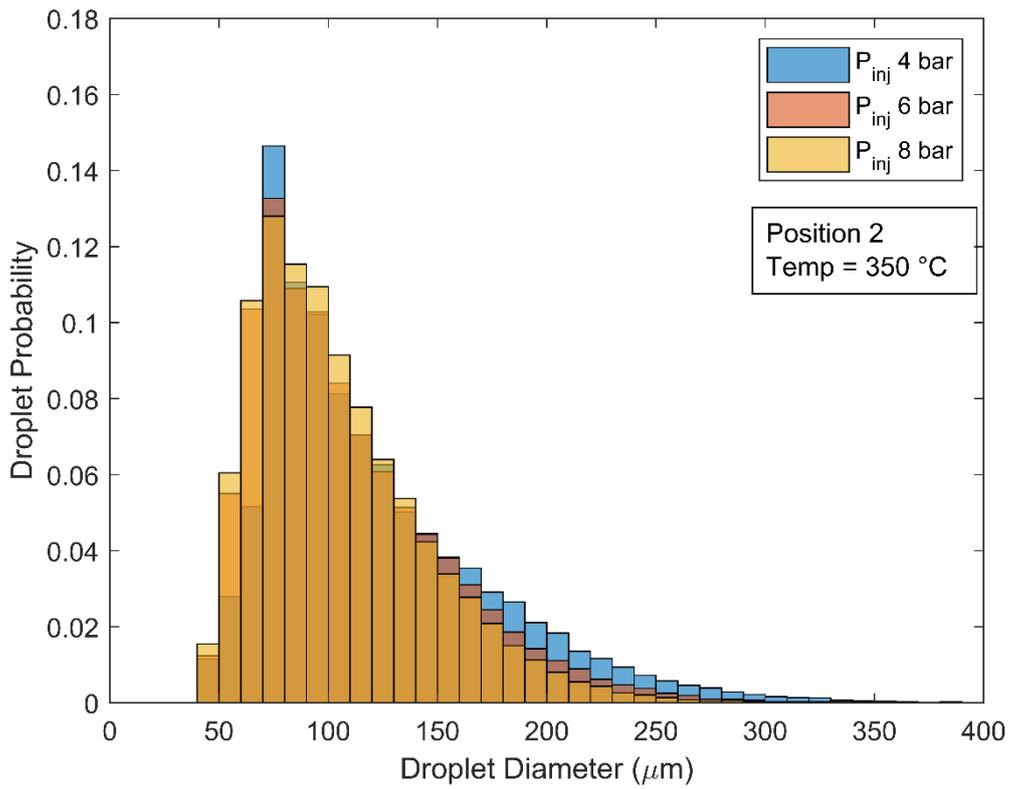


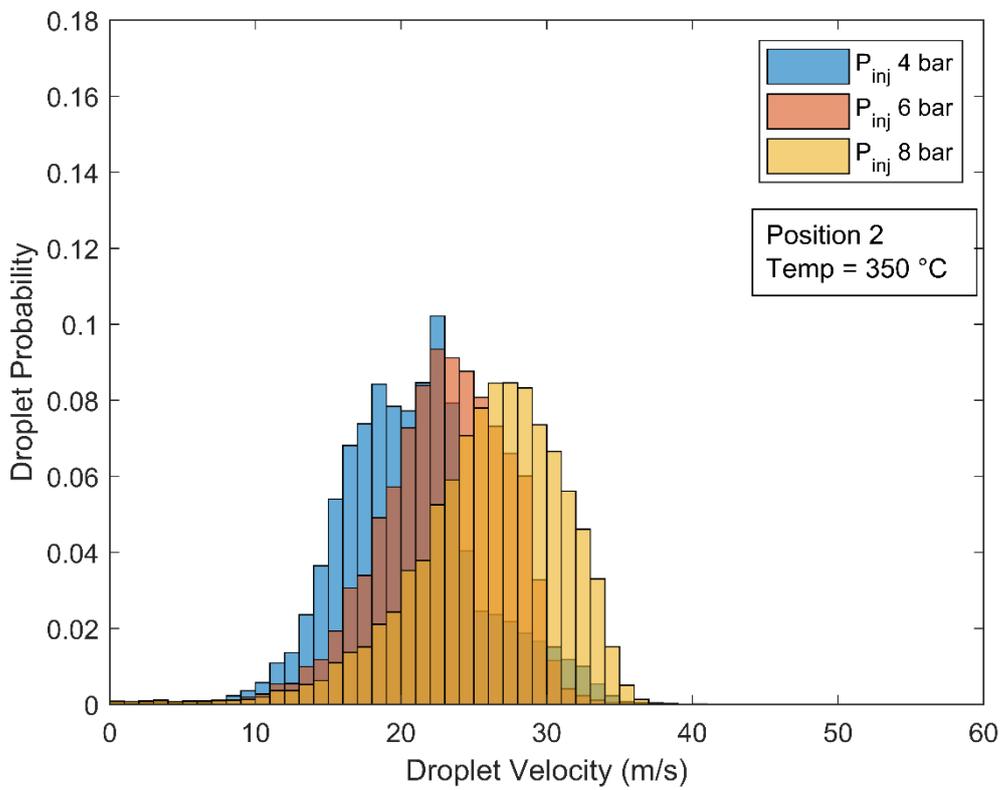
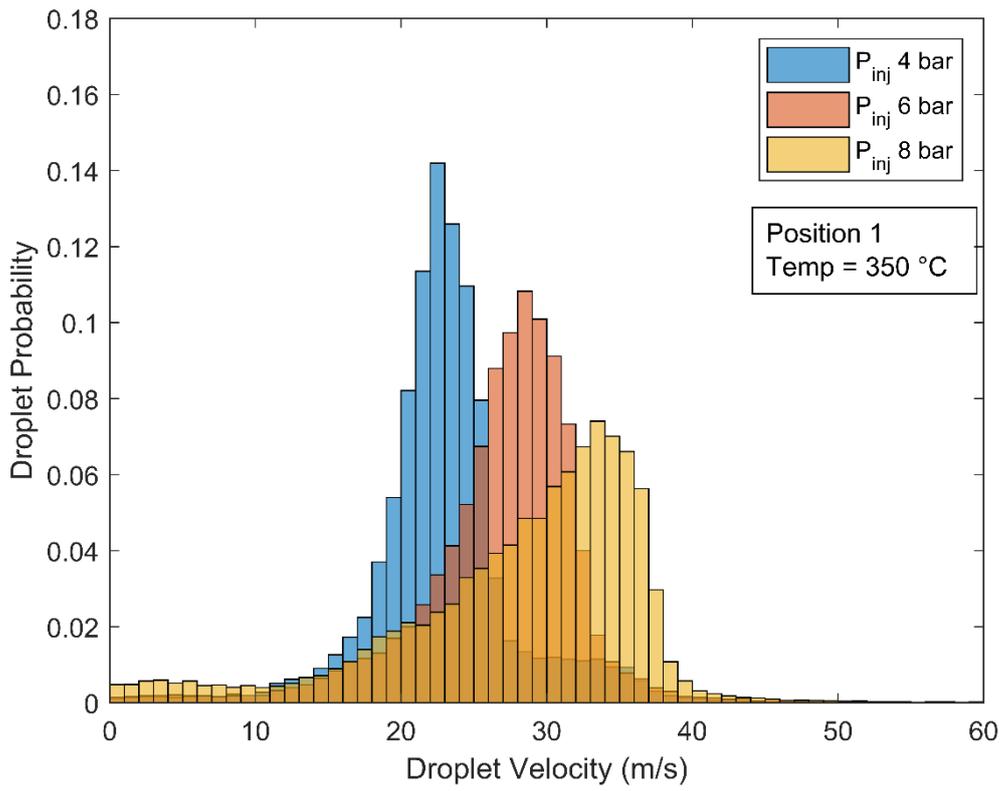


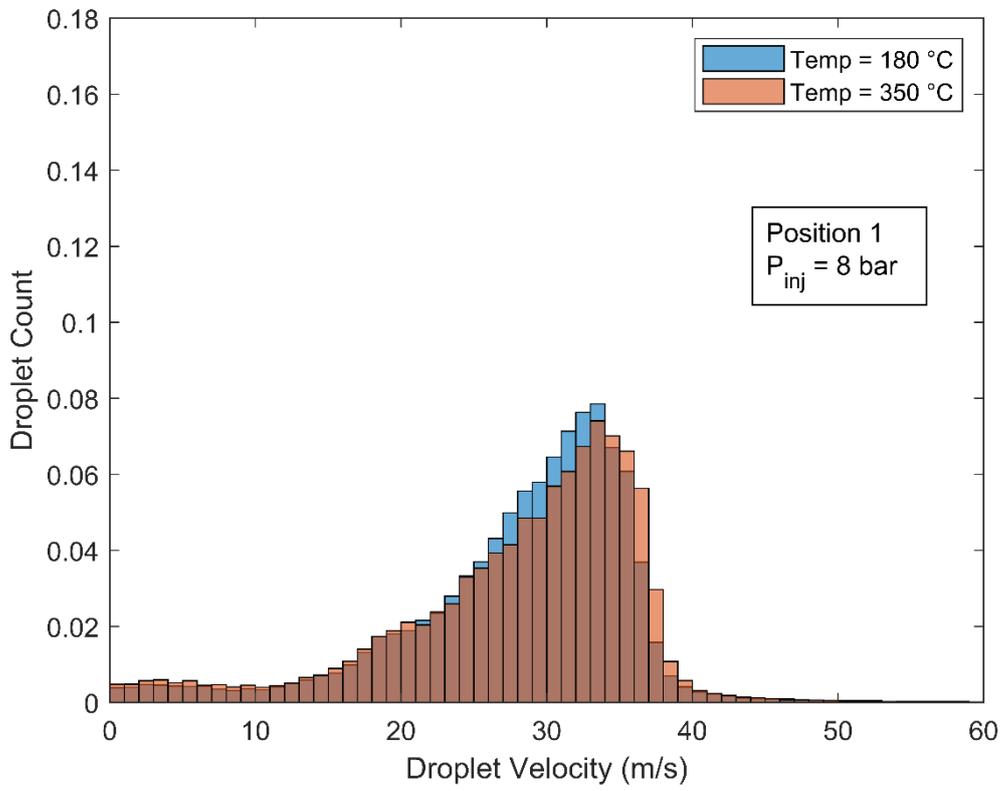
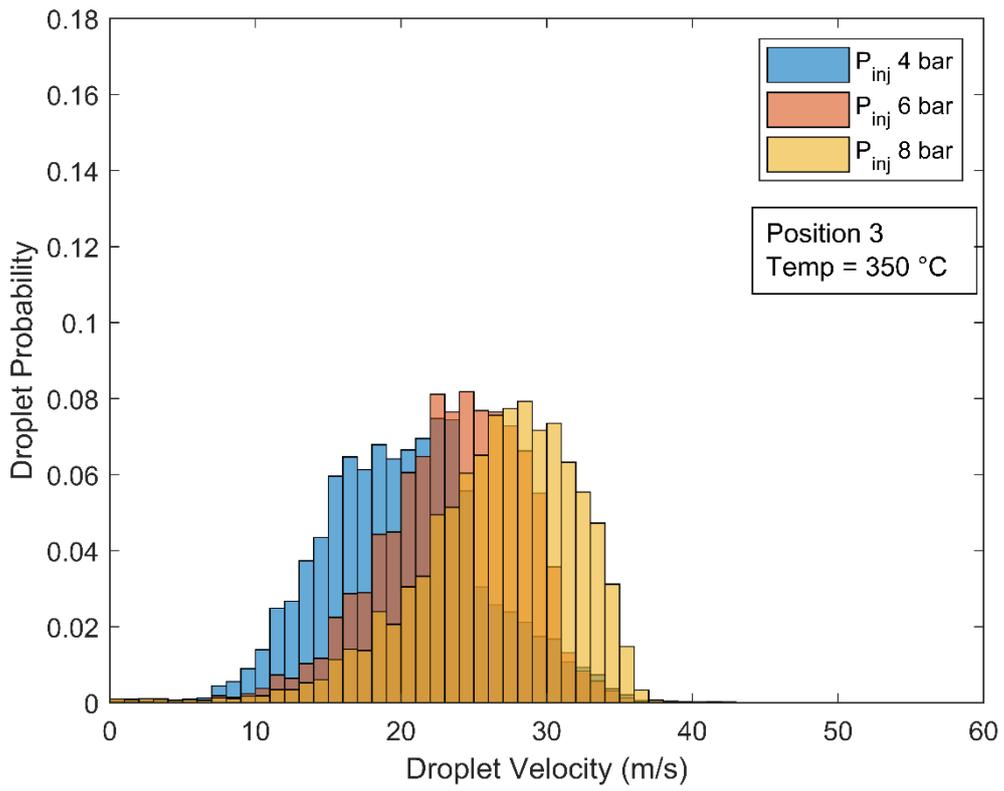
Anexo 2: Gráficas de resultados

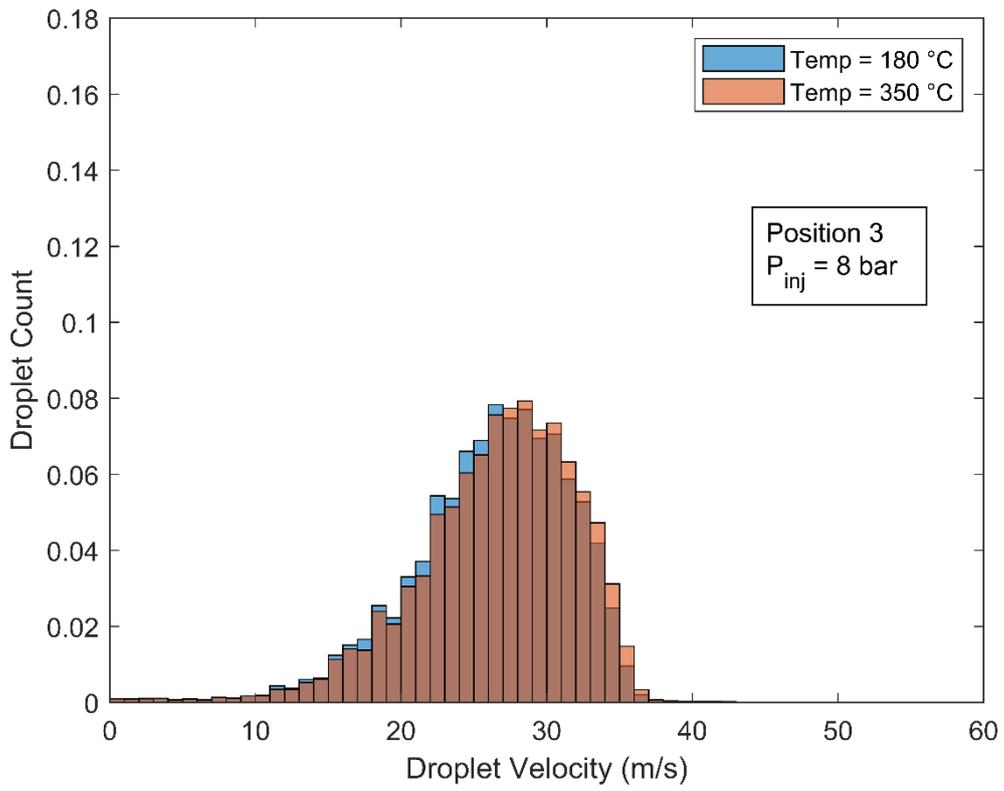
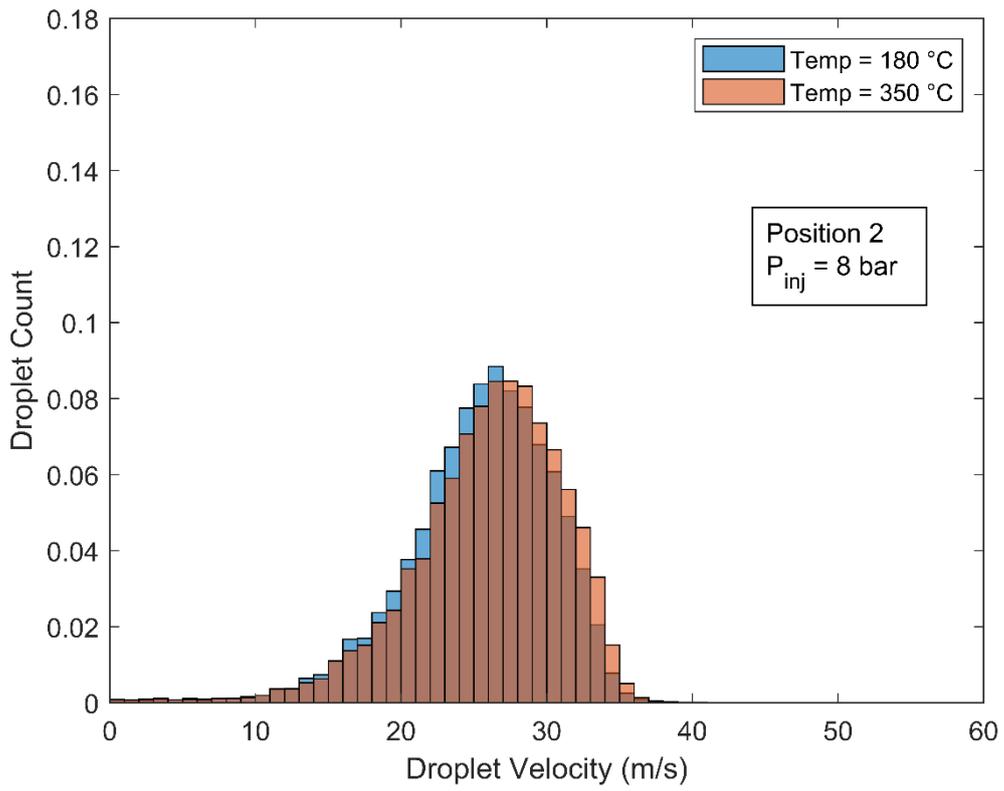
En este anexo se encuentran aquellas gráficas obtenidas que no aportan nada diferente a las ya comentadas en el apartado de resultados, pero sirven para corroborar las conclusiones de este trabajo.

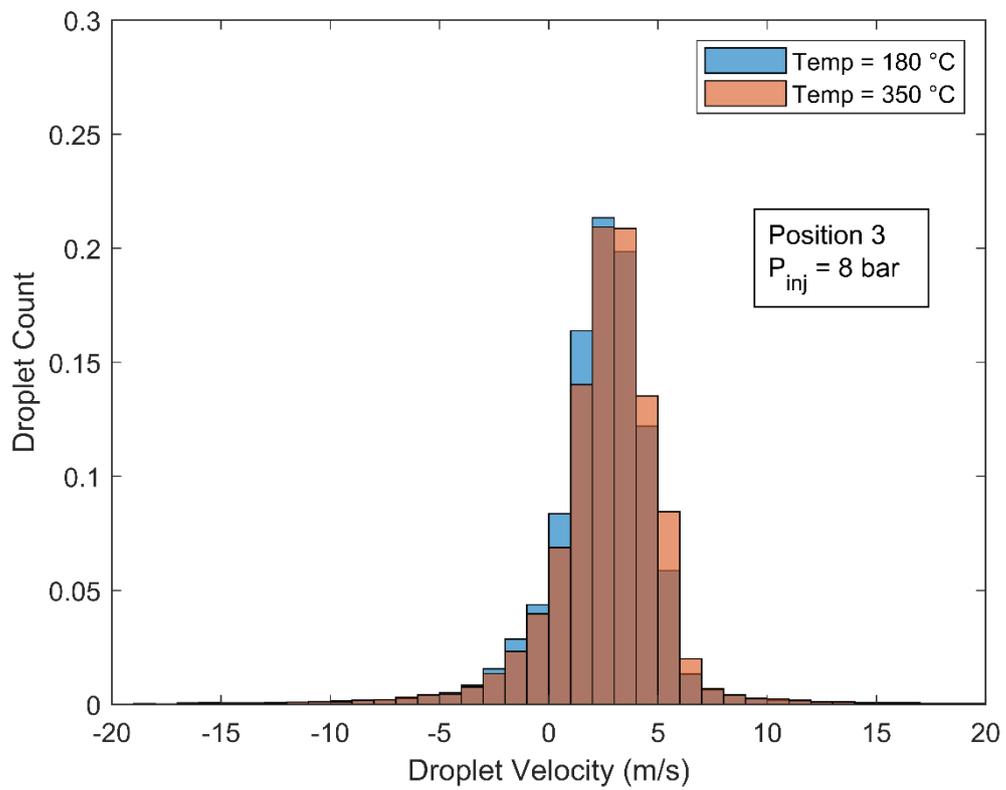
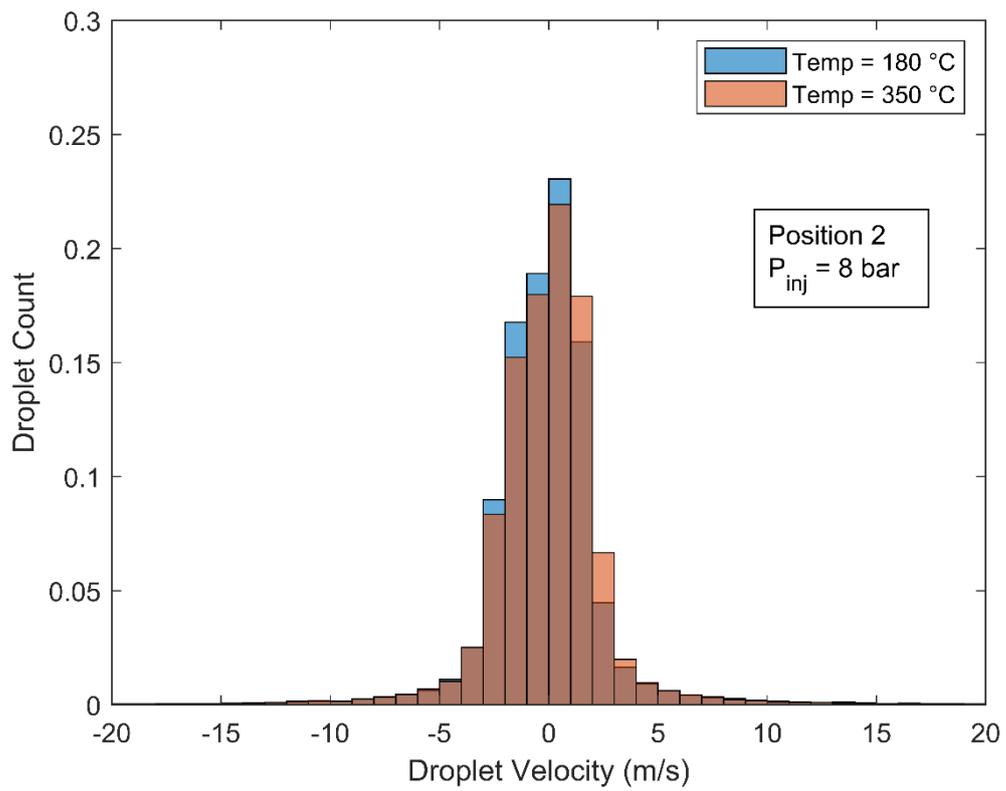






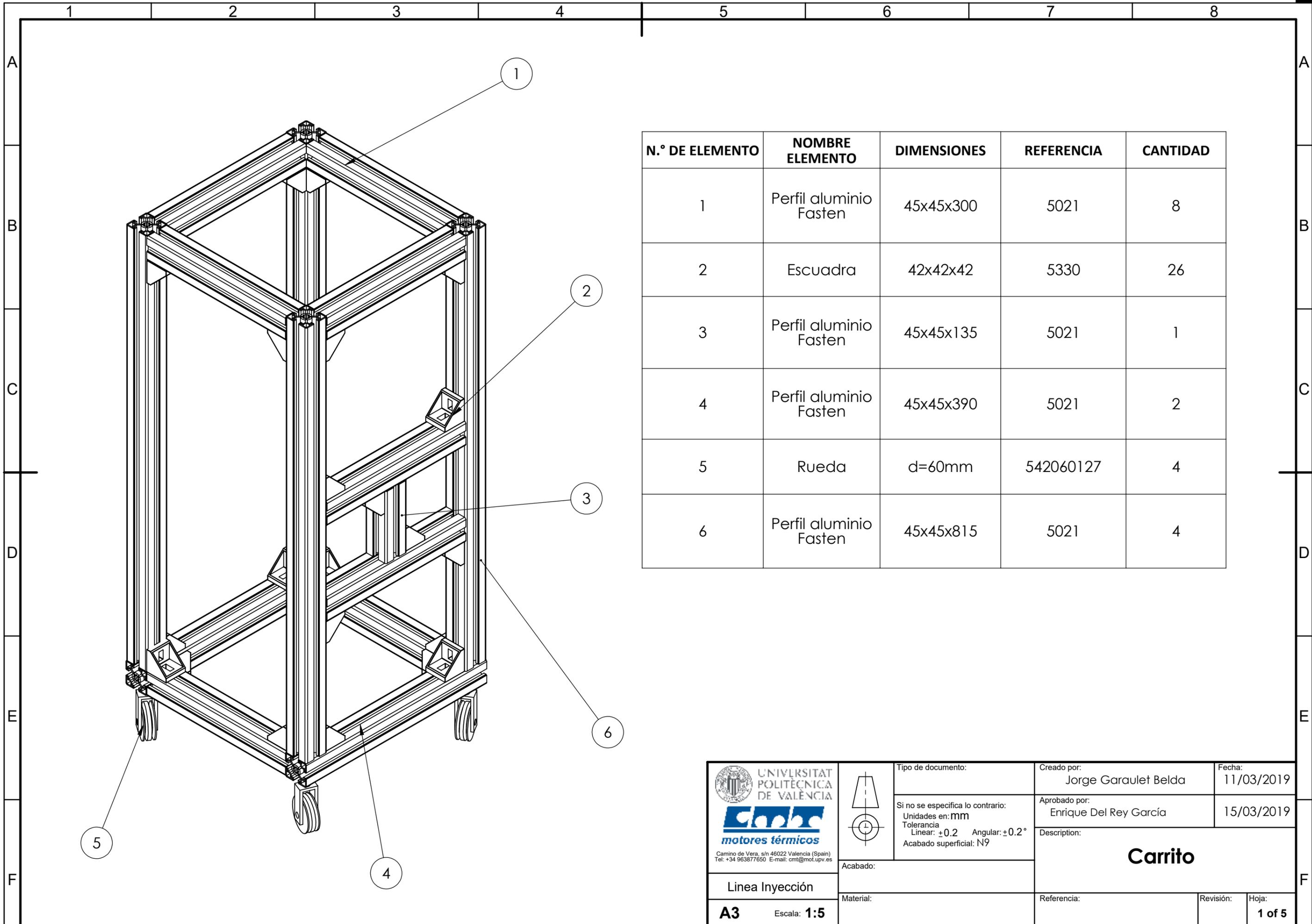






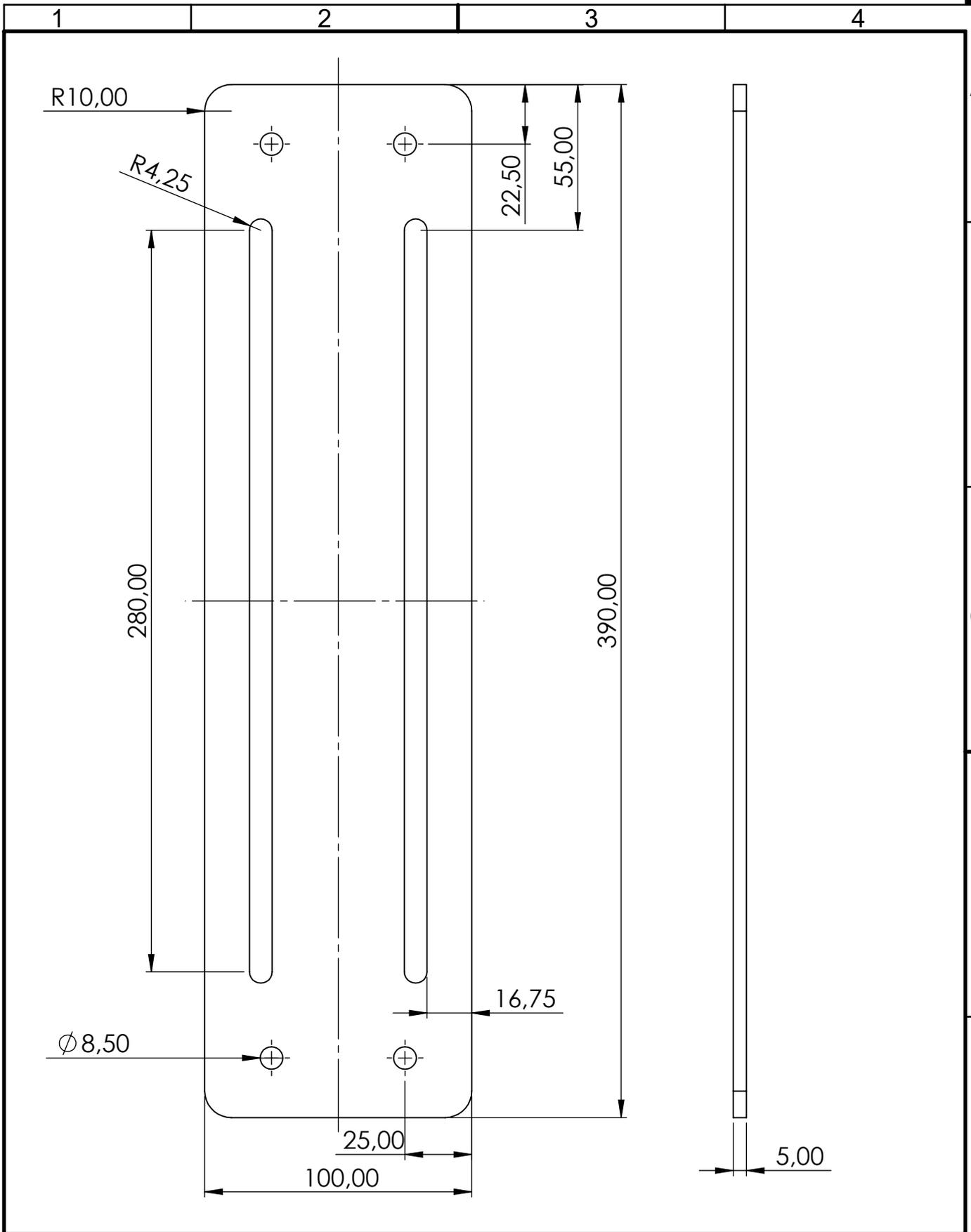
Parte IV

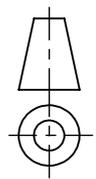
Planos

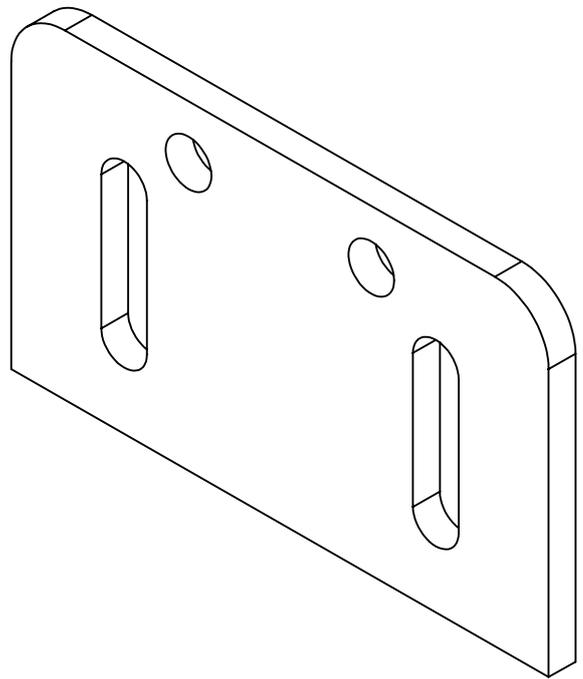
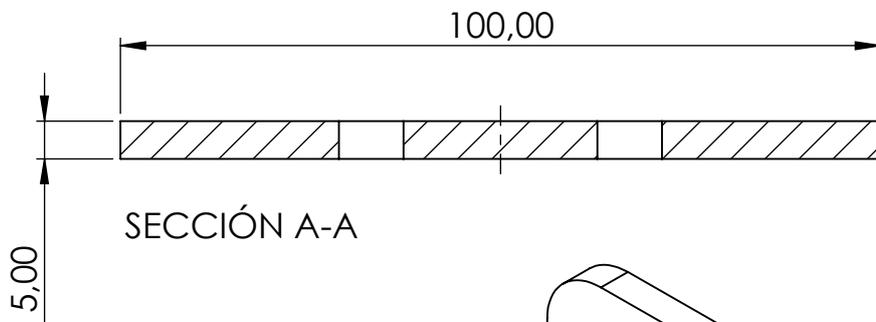
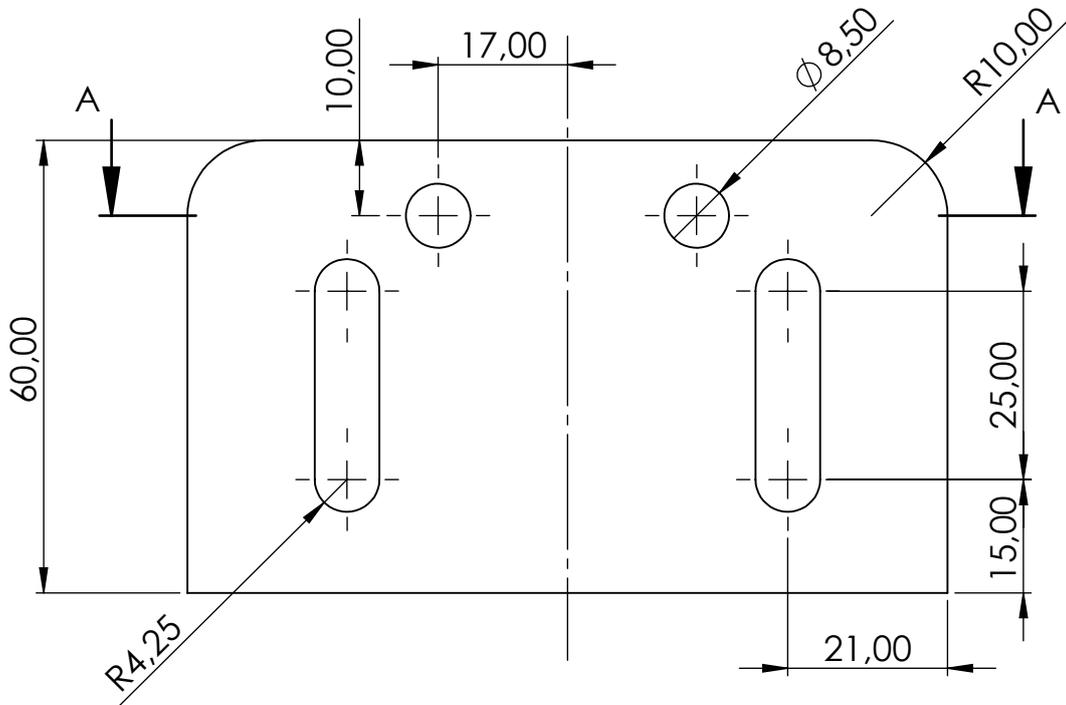


| N.º DE ELEMENTO | NOMBRE ELEMENTO | DIMENSIONES | REFERENCIA | CANTIDAD |
|-----------------|------------------------|-------------|------------|----------|
| 1 | Perfil aluminio Fasten | 45x45x300 | 5021 | 8 |
| 2 | Escuadra | 42x42x42 | 5330 | 26 |
| 3 | Perfil aluminio Fasten | 45x45x135 | 5021 | 1 |
| 4 | Perfil aluminio Fasten | 45x45x390 | 5021 | 2 |
| 5 | Rueda | d=60mm | 542060127 | 4 |
| 6 | Perfil aluminio Fasten | 45x45x815 | 5021 | 4 |

| | | | |
|---|---|---|----------------------|
|  UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA  motores térmicos <small>Camino de Vera, s/n 46022 Valencia (Spain) Tel: +34 963877650 E-mail: cmt@mot.upv.es</small> | Tipo de documento:  | Creado por: Jorge Garaulet Belda | Fecha: 11/03/2019 |
| | Si no se especifica lo contrario: Unidades en: mm Tolerancia Linear: ±0.2 Angular: ±0.2° Acabado superficial: N9 | Aprobado por: Enrique Del Rey García | 15/03/2019 |
| Descripción: <h2 style="text-align: center;">Carrito</h2> | | Referencia: | |
| Acabado: Material: | Revisión: | Hoja: | 1 of 5 |
| A3 Escala: 1:5 | | | |

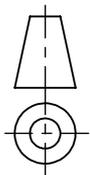


| | | | | |
|--|---|--|--|----------------------|
|  <p>UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA</p>  <p>Camino de Vera, s/n 46022 Valencia (Spain) Tel: +34 963877650 E-mail: cmt@mot.upv.es</p> |  | Tipo de documento: | Creado por: Jorge Garaulet Belda | Fecha: 11/03/2019 |
| | | Si no se especifica lo contrario: Unidades en: mm Tolerancia Lineal: ± 0.2 Angular: $\pm 0.2^\circ$ Acabado superficial: N9 | Aprobado por: Jose Enrique Del Rey García | 15/03/2019 |
| Acabado: | Placa Inferior | | | |
| Material: Acero Inox 304 | | | | Referencia: |
| A4 Escala: 1:2 | Linea Inyección | | | |



motores térmicos

Camino de Vera, s/n 46022 Valencia (Spain)
Tel: +34 963877650 E-mail: cmt@mot.upv.es



Tipo de documento:

Si no se especifica lo contrario:
Unidades en: mm
Tolerancia
Linear: ± 0.2 Angular: $\pm 0.2^\circ$
Acabado superficial: N9

Creado por:

Jorge Garaulet Belda

Fecha:

11/03/2019

Aprobado por:

Jose Enrique Del Rey García

15/03/2019

Description:

Placa interior

Acabado:

Material:

Referencia:

Revisión:

Hoja:

Linea Inyección

A4

Escala: 1:1

3 of 5

1

2

3

4

A

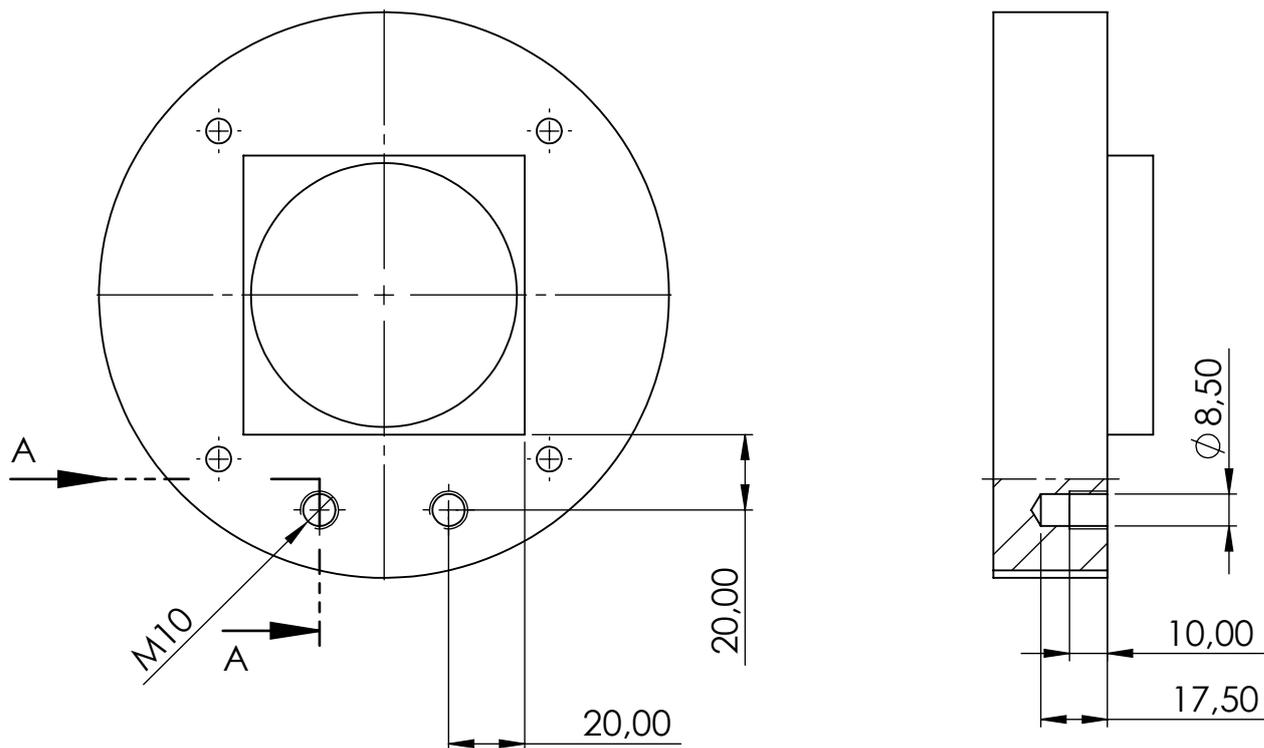
B

C

D

E

F



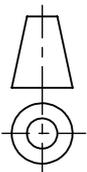
SECCIÓN A-A
ESCALA 1 : 2



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Camino de Vera, s/n 46022 Valencia (Spain)
Tel: +34 963877650 E-mail: cmt@mot.upv.es



Tipo de documento:

Si no se especifica lo contrario:
Unidades en: mm
Tolerancia
Linear: ± 0.2 Angular: $\pm 0.2^\circ$
Acabado superficial: N9

Creado por:

Jorge Garaulet Belda

Fecha:

11/03/2019

Aprobado por:

Jose Enrique Del Rey García

15/03/2019

Description:

Brida Entrada

Acabado:

Linea Inyección

Material:

Acero Inox. AISI 316

Referencia:

U1-10-01

Revisión:

Hoja:

4 of 5

A4

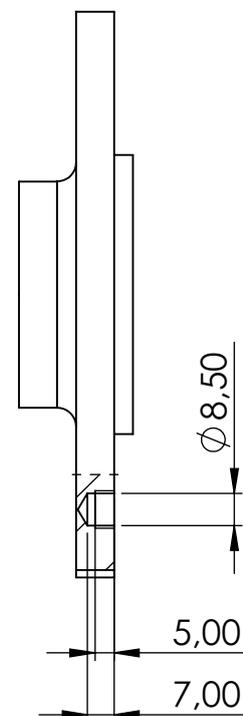
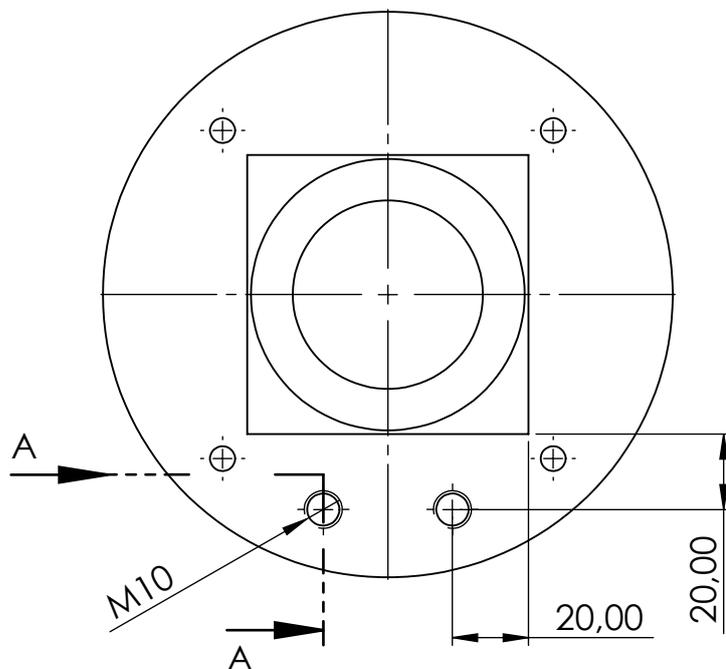
Escala: **1:2**

1

2

3

4



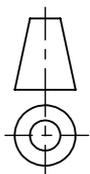
SECCIÓN A-A



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Camino de Vera, s/n 46022 Valencia (Spain)
Tel: +34 963877650 E-mail: cmt@mot.upv.es



Tipo de documento:

Si no se especifica lo contrario:
Unidades en: **mm**
Tolerancia
Linear: $\pm 0,2$ Angular: $\pm 0,2^\circ$
Acabado superficial: N9

Creado por:

Jorge Garaulet Belda

Fecha:

11/03/2019

Aprobado por:

Jose Enrique Del Rey García

15/03/2019

Description:

Brida Salida

Acabado:

Linea Inyección

Material:

Acero Inox. AISI 316

Referencia:

U1-10-02

Revisión:

Hoja:

5 of 5

A4

Escala: **1:2**