



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA
DEPARTAMENTO DE MÁQUINAS Y MOTORES TÉRMICOS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DEL DISEÑO

TRABAJO DE FIN DE GRADO

**Diseño y puesta a punto de un dispositivo para la
determinación experimental de la velocidad del sonido en
combustibles de automoción.**

Para la obtención del Grado en Ingeniería Mecánica

Autor:

Álvaro Gallega Gómez

Director:

Marcos Carreres Talens

Valencia, Julio de 2019

Agradezco a mi tutor Marcos Carreres por haberme guiado en la realización del Trabajo Final de Grado, y usar su tiempo y dedicación para la resolución de dudas y aportación de consejos necesarios para la realización de un trabajo de estas características.

De igual manera, agradezco al técnico de laboratorio José Enrique del Rey por haberme ayudado en los montajes experimentales y en la elaboración de los planos.

Por último, agradezco a mis padres y a mi hermana por haber estado en todo momento a mi lado y haber servido de apoyo bajo cualquier circunstancia.

Índice general

Índice general	V
Índice de figuras	VII
DOCUMENTO I MEMORIA	1
1 Planteamiento del proyecto	5
1.1. Introducción	5
1.2. Justificación y objeto del proyecto	6
1.3. Antecedentes	6
1.4. Viabilidad del proyecto	8
1.5. Estructura del proyecto	8
2 Marco teórico	11
2.1. Sistema de inyección <i>common rail</i>	11
2.2. Importancia de la velocidad del sonido en el sistema de inyección	16
2.3. Revisión bibliográfica	19
3 Montaje experimental	23
3.1. Principio de medida	23
3.2. Descripción de la instalación	24
3.3. Descripción de los componentes	26
3.4. Adquisición de datos	32
4 Resultados	35
4.1. Análisis de repetitividad	35
4.2. Validación de los resultados	41
5 Propuesta para dispositivo de alta presión	45
5.1. Descripción del dispositivo	45
5.2. Cálculo de tornillos	48
5.3. Cálculo con elementos finitos	53

6 Conclusiones y trabajos futuros	61
Bibliografía	63
DOCUMENTO II PRESUPUESTO	65
1 Persupuesto	69
1.1. Introducción	69
1.2. Metodología de cálculo	69
1.3. Resumen del presupuesto	73
DOCUMENTO III PLANOS	75

Índice de figuras

1.1. Departamento de Máquinas y Motores Térmicos de la Universidad Politécnica de Valencia.	7
2.1. Esquema del sistema <i>common rail</i> [1]	12
2.2. Principio de funcionamiento de un inyector [2]	15
2.3. Relación temporal entre presión y tasa en inyección simple [3]	17
2.4. Relación temporal entre presión y tasa en inyección múltiple [3]	17
2.5. Tasímetro Bosch	18
2.6. Izquierda: Célula de ultrasonidos de S.J Ball. [4] Derecha: Sistema a presión de S.J Ball [4].	20
2.7. Configuración ultrasónica adoptada por Piotr Kielczynski [5]	21
3.1. Principio de medida [6]	24
3.2. Transductores de abrazadera [6]	24
3.3. Fotografía de la instalación durante una medida	25
3.4. Tubo de acero inoxidable	27
3.5. Caudalímetro de ultrasonidos	27
3.6. Bomba utilizada en la instalación	28
3.7. Funcionamiento del intercambiador de placas	29
3.8. Termorregulador utilizado en la instalación	30
3.9. Estructura de perfiles de aluminio	31
3.10. Display lector de termopar	32
3.11. Izquierda: Transductores colocados en el mismo plano Derecha: Transductores colocados contrapuestos	33
4.1. Representación gráfica de las medidas 1 y 2 de dodecano	38
4.2. Representación gráfica de las medidas 1 y 2 de heptano	40
4.3. Representación gráfica del valor experimental frente al valor del NIST en el dodecano.	42
4.4. Representación gráfica de los valores experimentales con los valores del NIST	43
5.1. Maqueta completa a alta presión	46
5.2. Vista de sección de la maqueta	47

5.3. Vista de la conexión de alta presión	47
5.4. Tensión de Von Mises en la pieza principal	55
5.5. Tensión de Von Mises en la tapa de llenado. Vista inferior.	56
5.6. Tensión de Von Mises en la tapa de llenado. Vista superior.	57
5.7. Tensión de Von Mises en la tapa inferior. Vista inferior.	58
5.8. Tensión de Von Mises en la tapa inferior. Vista superior.	58

Documento I

MEMORIA

Índice de documento

1 Planteamiento del proyecto	
1.1. Introducción	5
1.2. Justificación y objeto del proyecto	6
1.3. Antecedentes	6
1.4. Viabilidad del proyecto	8
1.5. Estructura del proyecto	8
1.5.1. Memoria	8
1.5.2. Presupuesto	9
1.5.3. Planos	9
2 Marco teórico	
2.1. Sistema de inyección <i>common rail</i>	11
2.1.1. Componentes Del <i>Common rail</i>	13
2.2. Importancia de la velocidad del sonido en el sistema de inyección	16
2.3. Revisión bibliográfica	19
3 Montaje experimental	
3.1. Principio de medida	23
3.1.1. Condiciones De Operación	24
3.2. Descripción de la instalación	24
3.3. Descripción de los componentes	26
3.4. Adquisición de datos	32
4 Resultados	
4.1. Análisis de repetitividad	35
4.1.1. Dodecano	35
4.1.2. Heptano	38
4.2. Validación de los resultados	41
4.2.1. Dodecano	41
4.2.2. Heptano	42
5 Propuesta para dispositivo de alta presión	
5.1. Descripción del dispositivo	45
5.1.1. Elementos Del Dispositivo	45
5.1.2. Material	48

5.2. Cálculo de tornillos	48
5.2.1. Planteamiento Del Cálculo	49
5.2.2. Solución Adoptada	53
5.3. Cálculo con elementos finitos	53

6 Conclusiones y trabajos futuros

Bibliografía

Capítulo 1

Planteamiento del proyecto

1.1. INTRODUCCIÓN

Los motores que utilizan combustible diesel son motores de encendido por compresión (MEC), donde la combustión se produce por autoencendido de la mezcla como consecuencia de la alta presión que se genera en el interior del cilindro. El sistema de inyección es un elemento muy importante en los MEC ya que está estrechamente relacionado con la formación de la mezcla y la combustión. Estos dos procesos se producen en parte simultáneamente y, por lo tanto, resulta difícil encontrar una separación entre ambos. Por ello, es de gran importancia controlar la formación de la mezcla para condicionar la combustión hasta el punto deseado. Existen dos formas de formar la mezcla: La inyección indirecta (IDI) y la inyección directa (ID).

- Inyección indirecta. La inyección del combustible se produce fuera de la cámara de combustión. Es el aire el elemento principal de este tipo de inyección, al que en una precámara se le da un movimiento en forma de torbellino y posteriormente se le inyecta el combustible, generando así la mezcla.
- Inyección directa. La inyección del combustible se realiza en la misma cámara de combustión. En este caso el elemento responsable de la formación de la mezcla es el combustible, que debe ser inyectado con una presión elevada, atomizado, y bien repartido para que se produzca la formación de la mezcla correctamente.

Entre los MEC la forma de trabajo más extendida es la ID, donde el sistema de inyección cobra una gran importancia respecto al sistema de inyección de la IDI. Debe cumplir con las siguientes funciones:

- Inyectar el combustible en la cámara de combustión según la llamada tasa de inyección, que es la que determina las fases de la combustión en relación con el movimiento del pistón.

- Dividir las gotas de combustible en gotas más pequeñas (atomización), para aumentar la superficie de convección entre combustible y el aire caliente y acelerar así la evaporación.
- Realizar una buena mezcla del combustible con el aire en la cámara de combustión.

1.2. JUSTIFICACIÓN Y OBJETO DEL PROYECTO

El proceso de combustión es de vital relevancia para las prestaciones de un motor de combustión interna alternativo (MCIA). Para asegurar una buena combustión, es necesario realizar una correcta formación de la mezcla por parte del sistema de inyección. Con el objetivo de optimizar la eficiencia del proceso de inyección, el sistema debe aportar el combustible en condiciones favorables. Es aquí donde reside la justificación de este proyecto.

La velocidad del sonido influye directamente en el inicio de la inyección porque afecta a la apertura y el cierre de los inyectores, ya que como se verá está pilotado de manera hidráulica. Por ello es muy relevante saber la manera en la que se comporta esta variable en diferentes condiciones de presión y temperatura.

El alcance de este proyecto es realizar la medición de velocidad del sonido en combustibles mediante el principio físico de enviar una señal ultrasónica en el medio para después volver a recibirla y registrarla. A partir de este objetivo, el proyecto tiene dos partes bien diferenciadas. La primera es diseñar y montar una instalación que sea capaz de medir la velocidad del sonido en algunos combustibles de automoción a diferentes temperaturas. La segunda parte es calcular y diseñar una pieza donde el combustible también se pueda presurizar, para poder hacer un análisis más completo en la velocidad del sonido. En la actualidad se producen presiones de inyección muy elevadas (hasta 3000 bar), por lo que extender el estudio a condiciones de alta presión supone acercarse a las condiciones reales de operación del motor. Este diseño trabaja con un equipo de ultrasonidos diferente, más nuevo y preciso, que el departamento podrá utilizar en el futuro.

1.3. ANTECEDENTES

Este Trabajo Fin de Grado se ha realizado en el Departamento de Máquinas y Motores Térmicos (DMMT) de la Universidad Politécnica de Valencia, y más concretamente en la línea de Inyección, durante el curso 2018-2019.

El DMMT se creó en el año 1979, y lleva desde entonces realizando estudios encaminados a investigar los procesos termofluidodinámicos que dan lugar en los Motores de Combustión Interna Alternativos (MCIA).



Figura 1.1: Departamento de Máquinas y Motores Térmicos de la Universidad Politécnica de Valencia.

Se han llevado a cabo numerosos proyectos colaborando directa o indirectamente, con empresas importantes del sector de los MCIAs como: Renault, Grupo PSA (Peugeot-Citroen), Nissan, Volvo, Ford, BMW, Bosch, Derbi, ECIA, Iveco, MAN, Repsol, General Motors, RENFE o la EMT de Valencia.

La estructura del DMMT ha evolucionado a lo largo del tiempo para aumentar la productividad de los investigadores e incrementar el conocimiento y la eficiencia científica. Actualmente el departamento está dividido en las siguientes líneas de trabajo:

1. Inyección-Combustión
2. Renovación de la carga
3. Ruido
4. Transferencia de calor
5. Mantenimiento
6. CFD

La línea de Inyección del departamento fue creada en el año 1993 dentro de la línea de Combustión para caracterizar los sistemas de inyección en los motores Diesel y así poder hacer óptimo el proceso de formación de la mezcla y mejorar de esta manera el proceso de combustión. Los resultados que se obtienen son sintetizados en modelos que permiten evaluar el potencial de nuevas estrategias de trabajo para mejorar las prestaciones de los motores.

1.4. VIABILIDAD DEL PROYECTO

La viabilidad de un proyecto es la probabilidad que hay de llevarlo a cabo con éxito utilizando unos recursos determinados. Para analizar la viabilidad del proyecto hay que tener en cuenta algunos factores como el alcance del proyecto (los límites que tiene), fortalezas y debilidades, y recursos que hacen falta para llevarlo a cabo de manera adecuada.

Como el proyecto se ha realizado en el DMMT, la realización del mismo está asegurada ya que el departamento suministra los recursos tecnológicos, humanos y económicos para que pueda llevarse a cabo. Además hemos creído que realizar este proyecto aportaría información que ahora mismo no se tiene y en definitiva, es viable.

En lo referente a los recursos humanos el DMMT tiene una gran cantidad de doctores, ingenieros, técnicos con amplia experiencia que se han involucrado y han hecho posible que el proyecto se lleve a cabo.

En el aspecto económico, el DMMT se ha hecho cargo de todos los gastos que han derivado de la realización del proyecto. Es un aspecto fundamental, ya que estamos trabajando con máquinas y piezas que tienen un coste elevado. Ha sido necesario adquirir material a otras empresas externas.

Por último, en el ámbito tecnológico, se ha utilizado una gran cantidad de equipamiento que había disponible en el DMMT y otro que se ha pedido para la causa. También es necesario mencionar el software utilizado, que principalmente ha sido SolidWorks.

1.5. ESTRUCTURA DEL PROYECTO

La estructura que este proyecto consiste en tres documentos independientes: memoria, pliego de condiciones y presupuesto. A continuación se van a describir brevemente cada uno de ellos.

1.5.1. Memoria

La memoria, presente documento, es la parte principal del proyecto y es donde se expone la metodología empleada para realizarlo, los materiales utilizados, los resultados obtenidos y la conclusión final a la que llegamos. En este capítulo, *Planteamiento del proyecto*, lo que se hace es exponer de una manera muy general en qué consiste el proyecto y la manera de abordarlo.

En el capítulo de *Marco teórico*, se hará una exposición de la importancia de la velocidad del sonido en condiciones de inyección y también se mencionarán trabajos anteriores similares con propiedades de los combustibles.

En el capítulo de *Montaje experimental* se presentará cuál ha sido la metodología empleada para realizar los ensayos, al igual que una explicación detallada de todas y cada una de las piezas y máquinas utilizadas. También se detallará la manera en la que se han extraído los datos.

En el capítulo de *Resultados*, se expondrán los datos obtenidos de los ensayos de una manera ordenada, además de gráficos que nos ayuden a entenderlos.

En el capítulo de *Propuesta para dispositivo de alta presión*, se explicará cómo se ha diseñado un modelo para ensayar además de la influencia de la temperatura en la velocidad del sonido, la influencia de la presión. En él se podrá ver el diseño y los cálculos que se han llevado a cabo con el objetivo de extender la metodología presentada a condiciones de alta presión.

En el capítulo de *Conclusiones y trabajos futuros*, se hará una sintetización de todo lo anterior y se sacarán unas conclusiones. Además se indicará la manera de poder mejorar el trabajo realizado sobre todo, con el nuevo diseño para ensayar también la influencia de la presión en la velocidad del sonido.

1.5.2. Presupuesto

En el presupuesto se hallará una explicación y un desglose detallado de todos los costes que derivan de este proyecto: materia prima, personal y maquinaria.

1.5.3. Planos

En este documento se presentarán los planos elaborados del dispositivo de alta presión que se ha diseñado.

Capítulo 2

Marco teórico

Como se ha mencionado con anterioridad la velocidad del sonido tiene una gran influencia en el proceso de inyección como consecuencia de que los inyectores están pilotados hidráulicamente y esto afecta directamente en la apertura y cierre de los mismos. Por ello, es necesario conocer el funcionamiento y los componentes de un sistema de inyección diesel y cómo se comporta en función de la velocidad del sonido.

2.1. SISTEMA DE INYECCIÓN *COMMON RAIL*

Uno de los sistemas de inyección más utilizados actualmente es el sistema *common rail* debido a su flexibilidad y su versatilidad. El primero fue lanzado por Bosch en 1997 y se ha extendido porque es una buena solución para reducir el consumo de combustible y emisiones contaminantes y que el motor funcione de una manera más silenciosa [7].

El sistema recibe su nombre porque posee un acumulador de alta presión compartido que se encarga de abastecer el combustible a todos los cilindros.

En los sistemas de inyección diesel tradicionales se necesita generar la presión del combustible individualmente en cada inyección. En cambio, en el sistema *common rail*, la generación y la inyección de presión se hacen por separado de manera que el combustible esté siempre disponible y con la presión necesaria para su inyección. Así pues, con este sistema, se puede cambiar la tasa de inyección, la presión de inyección y también la cantidad de combustible inyectado.

En la Figura 2.1 se puede observar un esquema del sistema *common rail*. En él, vemos cómo el depósito alimenta la bomba de baja presión, que a su vez, lleva el combustible a una bomba de alta presión. Esta bomba está accionada por el cigüeñal del motor a través de un acoplamiento rueda dentada o correa dentada . A partir de ahí, el combustible es trasegado por el raíl común hacia los inyectores que están localizados en cada cilindro del motor. Una parte del combustible se inyecta en el cilindro y otra parte mucho más pequeña es utilizada para el pilotaje hidráulico de los inyectores.

Esta pequeña parte es recirculada hacia el depósito formando así el caudal de control de los inyectores. Además de su función como acumulador, el raíl común también realiza funciones de amortiguamiento de algunas vibraciones mecánicas producidas por la bomba de alta presión y por la salida de combustible por los orificios de los inyectores.

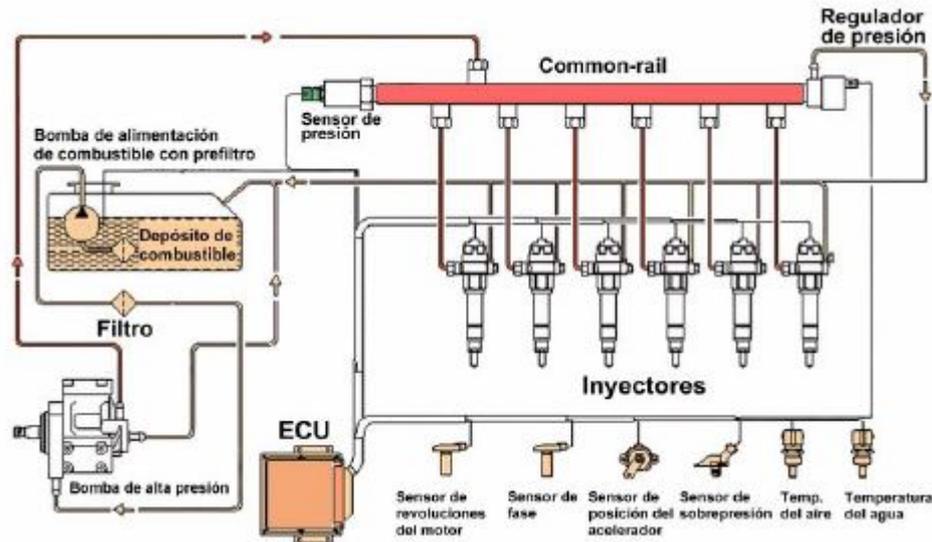


Figura 2.1: Esquema del sistema common rail [1]

Hay un sensor que mide la presión del combustible en el raíl, y esta se compara con la presión consigna asignada por la ECU. Si las dos presiones son distintas, un orificio de descarga que se sitúa en el regulador de presión se abre o se cierra para que los dos valores se igualen. El caudal de combustible sobrante vuelve al depósito.

Así pues algunas ventajas que nos ofrece el sistema *common rail* son las siguientes:

- Mayor rendimiento mediante una torsión mayor a baja velocidad del motor.
- Menor consumo de combustible
- Menor emisión de partículas de hollín debido al uso el filtro de partículas en el sistema de escape.
- Reducción del ruido
- Control *Closed Loop*
- Características programables que permiten el uso eficaz de biocombustibles
- Diagnósticos electrónicos
- Reducción de emisiones de NOx

2.1.1. Componentes Del *Common rail*

El sistema de inyección *common rail* se subdivide en tres subsistemas: el sistema de alta presión, el sistema de baja presión y el sistema de Regulación Electrónica Diesel (EDC). El sistema de alta presión es el encargado de inyectar el combustible en la cámara de combustión de los cilindros, mientras que el sistema de baja presión lleva el combustible a la bomba que forma parte del sistema de alta presión. El sistema EDC es el que está formado por los sensores, la unidad de control y los reguladores, que hacen posible tener un control de varias variables importantes en la inyección.

■ Sistema de baja presión

- **Depósito de combustible:** Es el encargado de almacenar el combustible que será utilizado en la inyección. Contiene un filtro de partículas para que ninguna partícula sólida pueda ser introducida en el sistema y obstruir así algunas vías.
- **Bomba de baja presión:** Se encarga de dotar al combustible de la presión suficiente para hacerlo llegar hasta la bomba de alta presión. Pueden ser de accionamiento eléctrico, generalmente en vehículos convencionales, o de accionamiento mecánico, comunes en vehículos industriales y de alta gama.
- **Líneas de baja presión:** Son los conductos encargados de conectar los elementos de baja presión. No soportan altas temperaturas, pero sí que presentan una resistencia ante posibles fugas con el fin de evitar la inflamación.
- **Filtro:** Su misión es que las impurezas no logren pasar al sistema de alta presión. Si esta circunstancia ocurriera se produciría cierta erosión y se generarían fallos de componentes. Hay que señalar que los orificios de inyección son muy pequeños, centenas de micras, por lo que cualquier inclusión de pequeñas partículas puede resultar crítico.

El filtro está formado por una malla de celulosa que está impregnada con resina y fibras sintéticas y es capaz de contener partículas mayores de alrededor de 5 micras. Se ha podido comprobar que solamente un 5% de estas partículas es capaz de pasar por el filtro.

Otra misión del filtro es separar el agua emulsionada que pueda estar en el combustible y poder evitar así fallos por oxidación.

■ Sistema de alta presión

- **Bomba de alta presión:** Por una parte hace llegar el combustible al acumulador de alta presión y por otra presuriza el combustible hasta llegar a las presiones que establece la ECU. Para motores rápidos, esta bomba es una bomba radial de pistones; mientras que en vehículos industriales se utilizan bombas en línea especiales.

- **Acumulador de alta presión:** Es lo que denominamos el raíl. Conecta con todos los inyectores, y en él se encuentra el combustible a alta presión antes de ser inyectado. Además, este acumulador de alta presión permite amortiguar y disipar las vibraciones originadas en la bomba de alta presión y los inyectores.
- **Inyector:** Es el elemento más complejo y más importante de todo el sistema. Según el sistema de accionamiento que posea nos podemos encontrar con inyectores accionados por válvula de tipo solenoide, con bobina de excitación o de tipo piezoeléctrico, con cristales de cuarzo. Estos últimos, más modernos, permiten una respuesta más rápida del inyector y mayor flexibilidad ante el cambio de estrategias de disminución de emisiones contaminantes que se basan en inyecciones múltiples. Además, hacen más reducido el tiempo que hay entre el envío del pulso eléctrico y el comienzo de la inyección. La explicación está en que el tiempo en el que se deforman los cristales de cuarzo es menor que el periodo de excitación de la bobina. Además, para reducir ese tiempo y las deformaciones mecánicas, se puede limitar la existencia de partes móviles en el inyector, y transformar el sistema pistón-aguja en solamente aguja.

En relación a lo descrito anteriormente, en la actualidad nos encontramos con tres tipos de inyectores:

- Inyector con válvula electromagnética e inducido en una pieza
- Inyector con válvula electromagnética e inducido en dos piezas
- Inducido con regulador piezoeléctrico

Como se ha dicho, los inyectores de tipo piezoeléctrico tienen mayor rapidez de respuesta a la hora de la apertura y el cierre de la aguja y es lo más aconsejable si lo que se pretende es realizar inyecciones múltiples. Pero el principio de funcionamiento y la estructura interna del inyector es la misma que la de un inyector de tipo válvula solenoide con la única excepción de que en este caso la ECU excita un accionamiento piezoeléctrico en lugar de una bobina. El principio de accionamiento de los inyectores piezoeléctricos se basa en la elongación que se produce en una serie de cristales de cuarzo cuando se le somete a una tensión. Esta elongación es la que se utiliza para accionar una válvula que hay dentro del inyector y poder controlar así, el proceso de apertura y cierre del mismo.

Para explicar el funcionamiento del inyector, lo mejor es hacerlo de manera secuencial, es decir, desde que el inyector está cerrado hasta que se produce el cierre del mismo analizando cada uno de los procesos internos que intervienen. Véase la Figura 2.2.

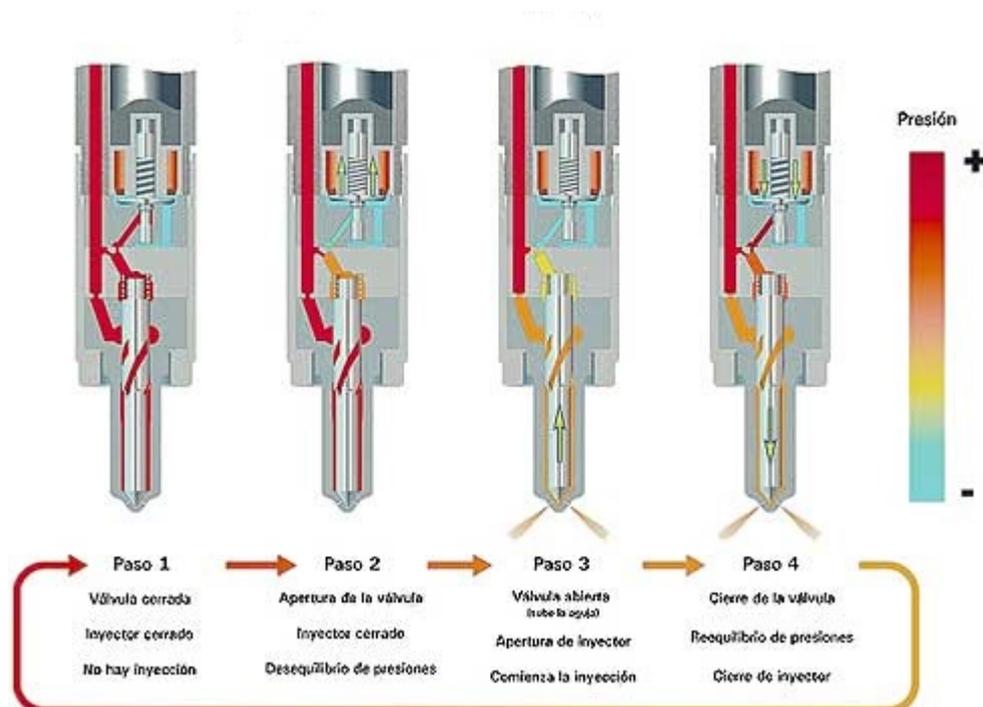


Figura 2.2: Principio de funcionamiento de un inyector [2]

- Cuando el inyector está cerrado, significa que el solenoide no está activado. En esta situación, en la parte alta del pistón de comando y en la parte baja de la aguja de la tobera, el combustible se encuentra a la misma presión, que es la presión del raíl. Como la sección de la parte alta del pistón de comando es mayor que la sección de la parte baja de la aguja, el conjunto pistón-aguja se encuentra en su posición más baja o reposo, bloqueando así los orificios de la tobera y evitando la inyección.
- Cuando se quiere empezar a inyectar combustible, la ECU envía un pulso eléctrico de elevada tensión y corriente. De la duración del mismo depende el tiempo de inyección y en consecuencia, la masa inyectada. Ese pulso eléctrico excita la bobina si se trata de una válvula de tipo solenoide, o deforma los cristales de cuarzo, si se trata de un inyector de comando piezoeléctrico. Esto provoca una fuerza de atracción hacia arriba mayor que la fuerza elástica del muelle de la válvula y hace que el vástago ascienda y que la esfera se libere desbloqueando así el orificio de salida del volumen de control.
- La velocidad de apertura de la aguja depende fundamentalmente de la manera en la que el flujo evoluciona al pasar por los estranguladores de salida y de alimentación. En el momento en el que el pistón de comando llega al límite de su desplazamiento, se retiene debido a la existencia del volumen de control, que tiene función de amortiguador, impidiendo el

descenso. En ese instante, el combustible es inyectado continuamente en la cámara de combustión a una presión aproximadamente igual a la que existe en el raíl.

- El final de la inyección viene precedido del final del pulso eléctrico. Es entonces cuando el vástago vuelve a su posición inicial y la pequeña esfera vuelve a obstruir el orificio de salida. El flujo de retorno es interrumpido y el combustible que viene del raíl llena el volumen de control a través del orificio de entrada. La presión presente en el volumen de control va estabilizándose hasta llegar aproximadamente a la presión que hay en el raíl. A pesar de que en ese instante hay la misma presión en la parte alta del pistón de comando y la parte baja de la aguja, es la diferencia de secciones lo que hace que la resultante de fuerzas de presión mueva al conjunto aguja-pistón hacia abajo. Así se origina el cierre de los orificios de descarga de la tobera y el final de la inyección.

2.2. IMPORTANCIA DE LA VELOCIDAD DEL SONIDO EN EL SISTEMA DE INYECCIÓN

Se puede definir la velocidad del sonido como la dinámica de la propagación de las ondas sonoras. Como es sabido, la velocidad del sonido sufre variaciones según el medio en el que se propague. Además también es sensible a la influencia de la temperatura y de la presión del medio. En nuestra aplicación, la velocidad del sonido influirá en la manera en que se propagan las ondas de presión en los inyectores.

Las propiedades que afectan al rendimiento del sistema de inyección de un motor diesel son, entre otras, velocidad del sonido, módulo de compresibilidad y densidad. La realidad es que están relacionadas entre sí y hay que hacer una explicación conjunta para entender su relevancia en condiciones de inyección.

En referencia a la densidad, algunos estudios han concluido que los combustibles con menor densidad tienen un menor caudal másico para las mismas condiciones de inyección (presión de inyección, contrapresión, y tiempo de energización), lo que conlleva que se inyecta menos masa de combustible en el cilindro [8,9]. Aunque no existe una relación tan directa entre densidad y caudal másico.

En el sistema *common rail*, el módulo de compresibilidad o módulo de Bulk (reducción de volumen de un fluido al estar sometido a un esfuerzo de compresión) también afecta a la inyección por su influencia en la velocidad del sonido. Lo que hace que las ondas de presión se propaguen de manera diferente avanzando o retrasando la apertura de la aguja y el inicio de la inyección. [10]. Esto se puede observar en la Figura 2.3, donde se puede ver la señal de presión y la señal de tasa. Esta figura muestra la correspondencia entre el tiempo que tarda una depresión en propagarse y por lo tanto, el

tiempo que tarda en caer la presión dando lugar a la tasa. Además, este aspecto es más importante en inyecciones múltiples, como muestra la Figura 2.4. En ella se observa que dependiendo de cuando se haga la segunda inyección, se estará cogiendo un pico o un valle de la onda de presión a la entrada del inyector y por tanto, un cambio en la masa inyectada por esa segunda inyección.

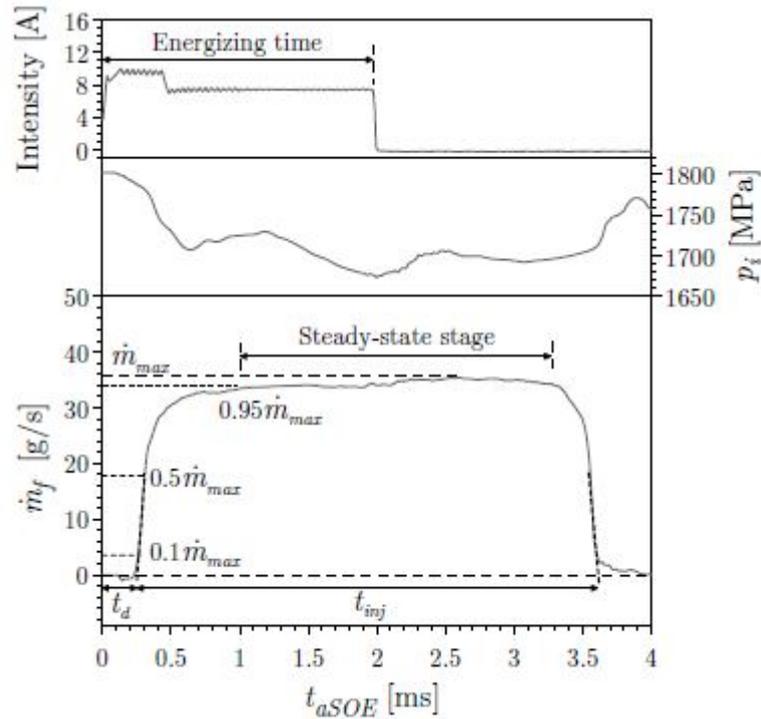


Figura 2.3: Relación temporal entre presión y tasa en inyección simple [3]

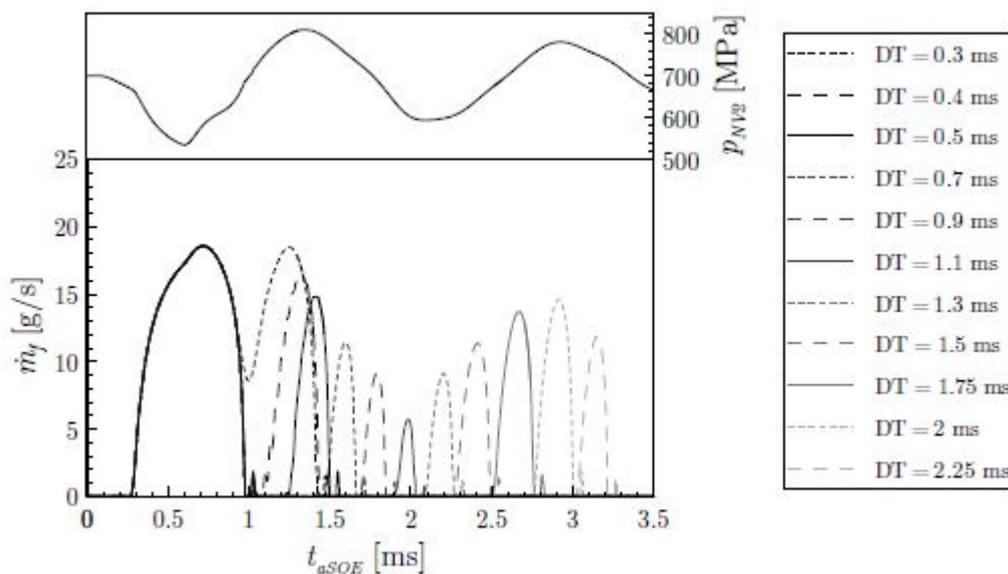


Figura 2.4: Relación temporal entre presión y tasa en inyección múltiple [3]

Por otro lado, estas dos propiedades, módulo de Bulk y velocidad del sonido, son necesarias para realizar las medidas experimentales de tasa de inyección con el método Bosch. Este método de medida es muy común, ya que tiene una gran precisión, abarca un amplio rango dinámico y la señal de tasa es captada adecuadamente. El funcionamiento del tasímetro Bosch (Figura 2.5) se basa en, cuando está lleno de combustible, el registro de la onda que se genera en la apertura del inyector aguas arriba de la tobera. Esta información se procesa con un sistema de adquisición, que nos representa una señal de la que se pueden extraer datos importantes como tiempo de inyección y cantidad de combustible inyectada.

Con anterioridad se ha dicho que la velocidad del sonido y el módulo de compresibilidad están relacionados. Esta relación se puede ver en la Ecuación 2.1, donde c es velocidad del sonido, B es módulo de Bulk y ρ es la densidad.

$$c^2 = \frac{B}{\rho} \quad (2.1)$$

La razón más importante por la que se produce un adelanto de la inyección es por la variación del módulo de Bulk. En algunos estudios como [11], se puede observar ese adelanto del tiempo de inyección. La razón del mismo reside en un mayor módulo de Bulk, lo que conlleva a una mayor velocidad del sonido. Al aumentar la velocidad del sonido, la aguja del inyector se de una manera más temprana.

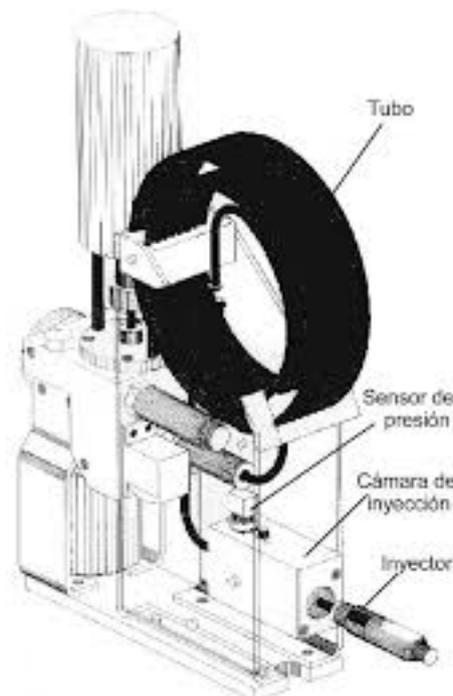


Figura 2.5: Tasímetro Bosch

2.3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Como ya se ha explicado con anterioridad, es muy importante conocer la influencia de la presión y de la temperatura en la velocidad del sonido en los combustibles de automoción, porque afecta directamente al sistema de inyección y consecuentemente, a las prestaciones del motor. Pero estas variables no solamente afectan a la velocidad del sonido, sino también a otros parámetros termodinámicos muy relevantes para la inyección como densidad, viscosidad y módulo de compresibilidad.

Este proyecto se ha centrado en la velocidad del sonido, pero hay otros trabajos que también han abordado otras variables termodinámicas como las mencionadas. El motivo es que algunas de estas propiedades tienen relación entre sí y todas afectan de una manera directa al proceso de inyección.

Además es interesante ver y comparar qué parámetros estudia cada trabajo, qué combustibles utilizan y la metodología que utilizan para medirlo. Al final, este proyecto se ha valido de diferentes trabajos que combinan de manera distinta cada uno de estos parámetros pero que han demostrado que la tecnología empleada es la adecuada para alcanzar el objetivo que se propone.

En cuanto a la temperatura a la que se miden las propiedades, generalmente han tomado el rango entre 293-298 K y 373 K. Aunque en el estudio de Nikolic [12], las medidas se realizan a una temperatura constante de 293 K.

Las presiones que se alcanzan son bastante variables, véase en la tabla 1. Esta variabilidad se debe a la capacidad que tienen las células donde se introducen los combustibles a soportar las grandes presiones. Todas las medidas comienzan en la presión atmosférica y llegan hasta , en el estudio de Kielczynski [5], los 210 Mpa.

Donde sí que existe una amplia variabilidad entre todos los estudios que se han analizado es en los combustibles utilizados habiéndose ensayado desde combustibles convencionales hasta biocombustibles.

Otro parámetro que ha de ser comparado es la frecuencia de excitación, que es la frecuencia con la que los pulsos ultrasónicos son enviados. Todos los estudios utilizan una frecuencia parecida que va desde 3 MHz hasta 5 MHz, una información muy relevante que ha sido utilizada para el diseño de este proyecto.

En cuanto a las células utilizadas, la más repetida es la que se muestra en la Figura 2.6 (Izquierda). En ella nos encontramos con un transductor (2) en el centro y dos reflectores (1) en los extremos. El transductor se energiza y emite pulsos iguales en ambas direcciones.

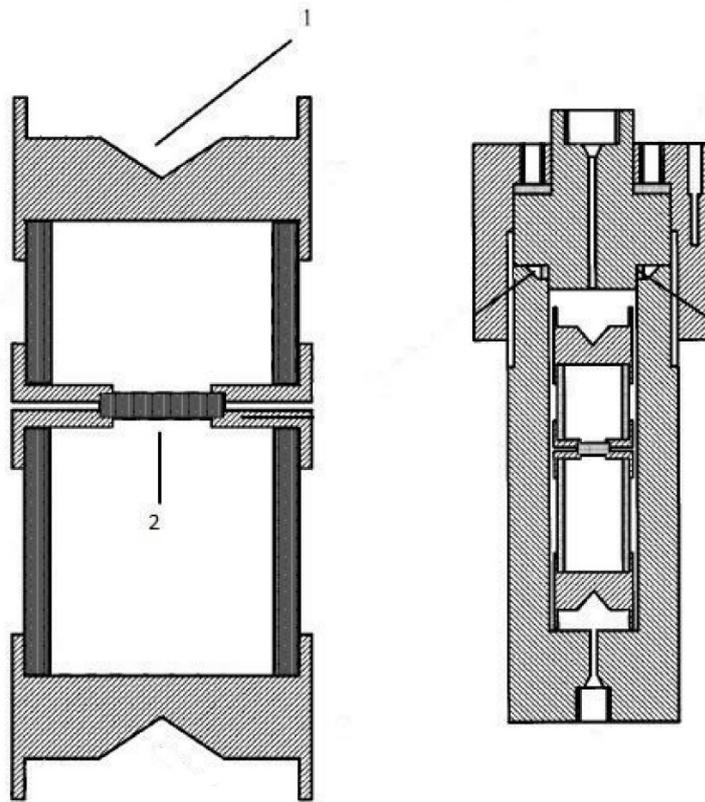


Figura 2.6: Izquierda: Célula de ultrasonidos de S.J Ball. [4] Derecha: Sistema a presión de S.J Ball [4].

Estos pulsos se digitalizan a través de un osciloscopio, que registra el regreso del eco de los mismos para guardar de esta manera la medida. Esta célula está contenida en un recipiente a presión. Las altas presiones se logran a través del orificio de llenado y haciendo uso de una conexión de alta presión, Figura 2.6 (Derecha). Para lograr variar la temperatura este recipiente está sumergido en un baño hecho a medida.

Otra solución es la que aporta Kielczynski [5], en la que en lugar de un transductor y dos reflectores, utiliza directamente dos transductores. El sistema de presurización hace uso de un pistón para alcanzar las altas presiones. El control de temperatura es similar, véase en la Figura 2.7.

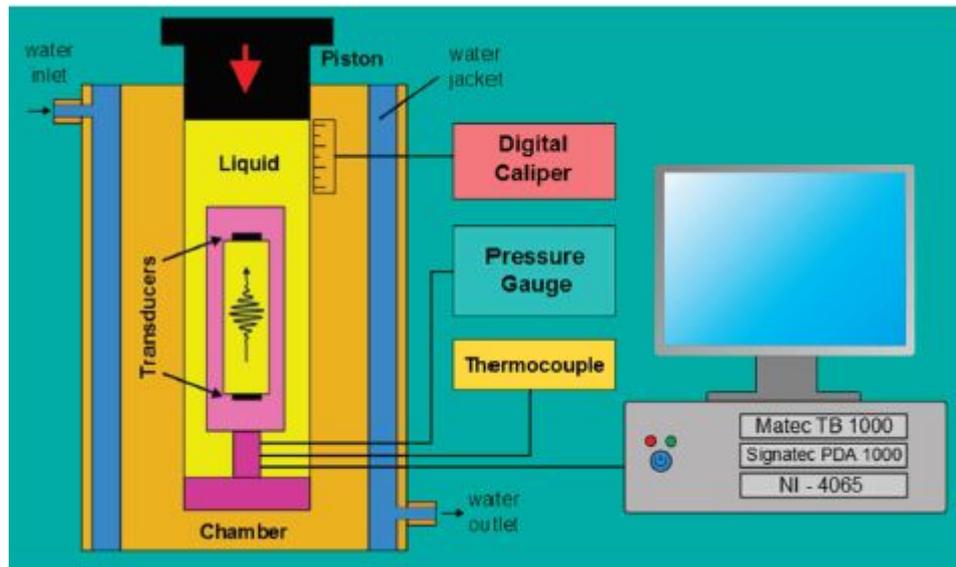


Figura 2.7: Configuración ultrasónica adoptada por Piotr Kielczynski [5]

Para concluir con este apartado se presenta la Tabla 2.1 donde se encuentran una serie de variables que diferencian a cada una de las investigaciones que se han realizado y en las que se ha apoyado este proyecto.

Autor	Temperatura	Presión máxima	Combustibles	Forma de medir	Frecuencia
S.J.Ball [4]	298-373 K	100 MPa	Hexano y Hexadecano	1 transductor y 2 reflectores	5 MHz
Daridon [13]	293,15-373,15 K	150 MPa	S250 y S300	2 piezoeléctricos y generador de ultrasonidos	3 MHz
Dávila [14]	298,15-343,15 K	60 MPa	Metanol	1 transductor y 2 reflectores	5 MHz
Kielczynski [5]	293-323 K	210 Mpa	DAG oil	2 transductores	5 MHz
Ndiaye [15]	283-423 K	200 MPa	Shell Normafluid	2 piezoeléctricos y generador de ultrasonidos	3 MHz
Peleties [16]	293,15-413,15 K	140 MPa	DIDP	1 transductor y 2 reflectores	5 MHz
Tat [10]	294 K	34,74 MPa	Biodiesel	1 transductor que actúa de emisor y receptor	5 MHz

Tabla 2.1: Tabla resumen de estudios anteriores.

Capítulo 3

Montaje experimental

Una vez se ha expuesto la manera en la que otros estudios han utilizado el principio de medida basado en ultrasonidos y han demostrado su validez, se va a realizar una propuesta de montaje cuyo objetivo es la medición de velocidad del sonido con una temperatura variable.

3.1. PRINCIPIO DE MEDIDA

Para la medida de velocidad del sonido se ha utilizado un caudalímetro de ultrasonidos disponible en el departamento. Este caudalímetro utiliza el ultrasonido para la medida del caudal del líquido, pero también es capaz de aportar la velocidad del sonido en el mismo. Para ello utiliza el llamado método del tránsito. El instrumento mide la desviación de las señales ultrasónicas resultantes del paso de las mismas a través del líquido que es medido. Las señales ultrasónicas son emitidas alternativamente en la dirección del caudal y en contra. A diferencia de los equipos estudiados en la bibliografía, la señal ultrasónica se transmite de manera oblicua, véase en la Figura 3.1. Ya en el diseño del dispositivo de alta presión, se propone un nuevo equipo donde la señal se transmite axialmente.

El medio que fluye causa diferentes tiempos de tránsito de estas dos señales de sonido. Para esta diferencia, el equipo identifica la velocidad del flujo promedio así como la velocidad del sonido a lo largo de la trayectoria de la propagación acústica.

Las ondas ultrasónicas también se propagan en materiales sólidos. Así, los transductores (alternativamente operando como transmisores y receptores) pueden ser montados en la parte externa de las tuberías, en nuestro caso del tubo de ensayo. Esto provoca que la instalación sea muy fácil y pueda ser realizada mientras el proceso esté en operación. Para evitar las malas medidas el equipo, con una electrónica especial, comprueba la utilidad de las señales ultrasónicas entrantes y evalúa la validez de los valores medidos.

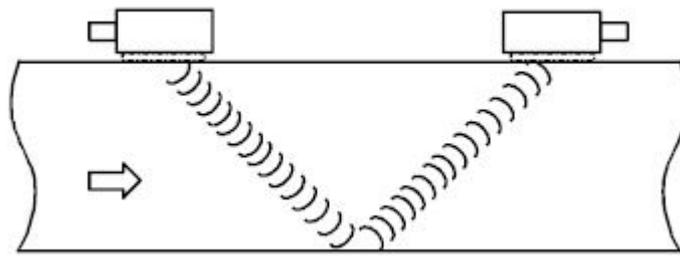


Figura 3.1: Principio de medida [6]

El microprocesador integrado en el equipo controla el ciclo completo de medida, eliminando señales de perturbación mediante técnicas de procesamiento de señales estadísticas.

3.1.1. Condiciones De Operación

El equipo de medida ofrece algunas ventajas. Estas se derivan del principio de medida, que utiliza el método del tránsito en conjunto con unos transductores de abrazadera, Figura 3.2. Puede ser usado donde la tubería o tubo y el líquido que va a ser medido son sónicamente conductivos.



Figura 3.2: Transductores de abrazadera [6]

Esto se produce cuando el material de los tubos o tuberías están formados por un material homogéneo y para los líquidos, que transportan solamente una cierta cantidad de partículas sólidas o burbujas de gas. No hay una dependencia de algunos parámetros eléctricos como la conductividad o la constante dieléctrica.

Con el equipo, la velocidad del sonido puede ser determinada inmediatamente de manera no invasiva desde el exterior del tubo y sin interrupción del proceso. El montaje de los transductores es sencillo por lo que la medida de velocidad del sonido puede ser hecha en varias localizaciones del tubo. La instalación no influye en alteraciones en el tubo ni influye en el área de la sección en condiciones normales.

3.2. DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN

Para caracterizar la velocidad del sonido en algunos combustibles de automoción y la influencia de la temperatura en ella se ha utilizado una instalación montada y

puesta a punto exclusivamente para la realización de este estudio y el presente TFG en el DMMT.

En general, la instalación es capaz de hacer circular un flujo de combustible a través de un volumen de control, en donde se realiza la medida, y tener además un control de la temperatura del mismo.

Para ello se ha diseñado una estructura formada por siete perfiles de aluminio que sirve de soporte para todos los demás elementos. Sobre ella se ha montado un tubo de acero inoxidable, una bomba y un intercambiador de calor. El tubo de acero inoxidable es el volumen de control de la instalación y es donde se colocan los transductores para realizar la medida. Tiene un orificio de entrada y otro de salida. La bomba es la encargada de impulsar el combustible hacia el intercambiador de calor para variar así la temperatura y que llegue en las condiciones deseadas al tubo de acero inoxidable. Después de pasar por el tubo de acero inoxidable, el combustible vuelve a la bomba para cerrar así el circuito. Estos tres elementos están conectados entre sí por tres latiguillos aptos para que puedan soportar temperaturas de hasta 90°C .

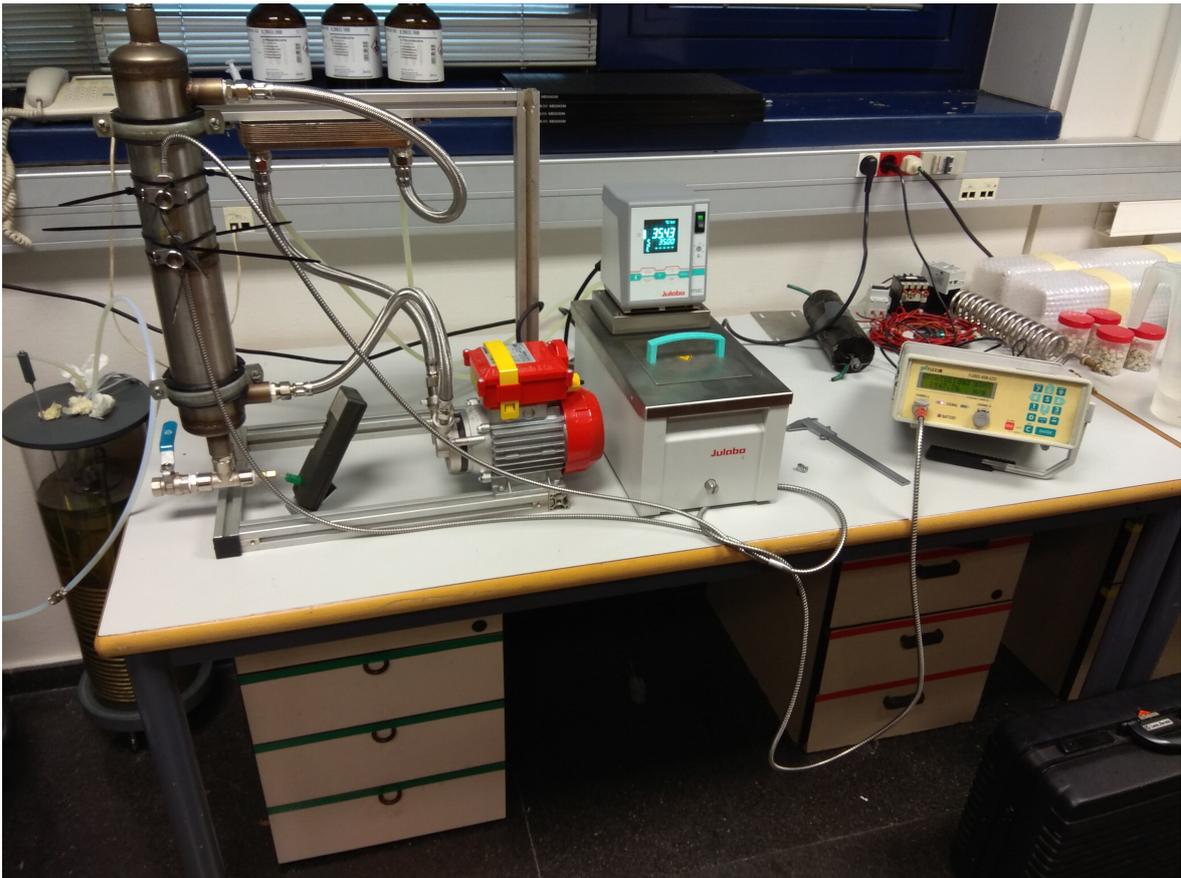


Figura 3.3: Fotografía de la instalación durante una medida

Por otro lado, el control de la temperatura se realiza con un termorregulador que está conectado al intercambiador de calor. La misión del termorregulador es regular la

temperatura del combustible. Para ello forma un circuito secundario con el intercambiador de calor. Lo que hace es calentar el líquido que se le ha proporcionado (glicol) y, con una bomba propia, hacerlo pasar por el intercambiador de calor para después volver cerrando el circuito. De esta forma, se consigue que tanto el glicol como el combustible sujeto de ser medido se crucen en el intercambiador de calor y lograr la variación de temperatura deseada del combustible.

La temperatura a la que está el glicol y que proporciona el termorregulador no es la temperatura que se debe tomar como referencia. Esto es debido a que el intercambiador tiene un salto de temperatura que hace que el glicol y el combustible no se encuentren a la misma temperatura. Por ello, y para realizar las medidas correctamente, se ha instalado un termopar que se ha introducido en el tubo de acero inoxidable por el orificio de vaciado. El sensor está conectado a un aparato display de termopar que proporciona de esta manera la temperatura real a la que está el combustible dentro del tubo.

El tubo de acero inoxidable, además de los orificios de entrada y salida de combustible tiene dos orificios más. En la parte superior tiene uno que es utilizado para introducir el combustible con la ayuda de un embudo. En la parte inferior, posee otro de idénticas características. A este orificio se le ha conectado un codo, que a la vez está conectado a una válvula de bola. De esta manera se garantiza que el combustible no salga del circuito y también se garantiza el vaciado del mismo.

3.3. DESCRIPCIÓN DE LOS COMPONENTES

En este apartado se va a realizar una descripción detallada de todos y cada uno de los componentes que forman parte de la instalación.

■ Tubo de acero inoxidable

Es el elemento sobre el que se colocan los transductores del caudalímetro de ultrasonidos para realizar la medida. Debe estar lleno de combustible constantemente para que no se produzcan errores en la medida.

Se trata de un tubo cilíndrico de 46 cm de longitud, 76 mm de diámetro y 2 mm de espesor. Está tapado por ambas bases. Tiene 4 orificios. Uno en la parte superior, otro en la parte inferior, y otros dos situados sobre la cara longitudinal y encarados hacia la misma dirección, véase en la Figura 3.4. Por estos dos últimos es por donde entra y sale el combustible impulsado por la bomba. El orificio superior es por donde el tubo es llenado de combustible.



Figura 3.4: Tubo de acero inoxidable

Al orificio que está situado en la parte inferior se le ha conectado un codo y una válvula de bola para facilitar de esta manera el vaciado.

■ **Caudalímetro de ultrasonidos**

Está formado por dos partes. El aparato principal y los transductores. En el panel frontal se encuentra la clavija para conectar los transductores, las teclas para controlar el caudalímetro y la pantalla. La toma de luz está localizada en la parte posterior. Se puede ver en la Figura 3.5



Figura 3.5: Caudalímetro de ultrasonidos

Este equipo es capaz de aportar velocidad del sonido, caudal volumétrico y caudal másico haciendo uso de los ultrasonidos en tuberías cerradas. Utiliza dos transductores que se montan en el exterior de las tuberías. Esto significa que las medidas se realizan de manera no invasiva, sin que afecte a las tuberías ni al fluido. Los transductores son pequeños, ligeros y robustos. El equipo es portátil, ya que posee una batería, algo adecuado si se requiere hacer un trabajo de campo.

El modelo utilizado es el Fluxus ADM 6725 de la marca FLEXIM. Es capaz de leer velocidades de flujos de 0,01 a 25 m/s , con una resolución de 0,025 cm y un error del 1 % [6].

■ Bomba

Es la encargada de dotar al combustible de la energía suficiente para hacerlo circular por el circuito, pasando de esta manera por el intercambiador de calor. Se trata de una bomba adquirida a propósito para este TFG.

El modelo utilizado es el Novax20-B [17] de la marca Rover Pompe. Es capaz de soportar temperaturas de hasta 95°C, algo esencial para el correcto funcionamiento de la instalación. Además puede tener un caudal de hasta 1700 l/h y vencer una altura máxima de 20 m. Fue necesario diseñar dos roscas de 1/2 GAS para poder conectar los latiguillos. Se puede ver en la Figura 3.6.



Figura 3.6: Bomba utilizada en la instalación

■ Intercambiador de calor

Su misión es transferir el calor generado por el termorregulador al combustible. Para ello se hace pasar por él, por un lado el combustible y por otro el glicol utilizado por el termorregulador.

Se trata de un intercambiador de placas soldadas que consta de un conjunto de placas de acero inoxidable corrugadas, rotadas 180° entre sí. Las placas se sueldan al vacío utilizando cobre conformando una unidad resistente a altas presiones. Por los espacios independientes que así se generan se hacen circular a contracorriente los medios involucrados en el intercambio de calor: combustible y glicol. Su funcionamiento se puede ver en la Figura 3.7

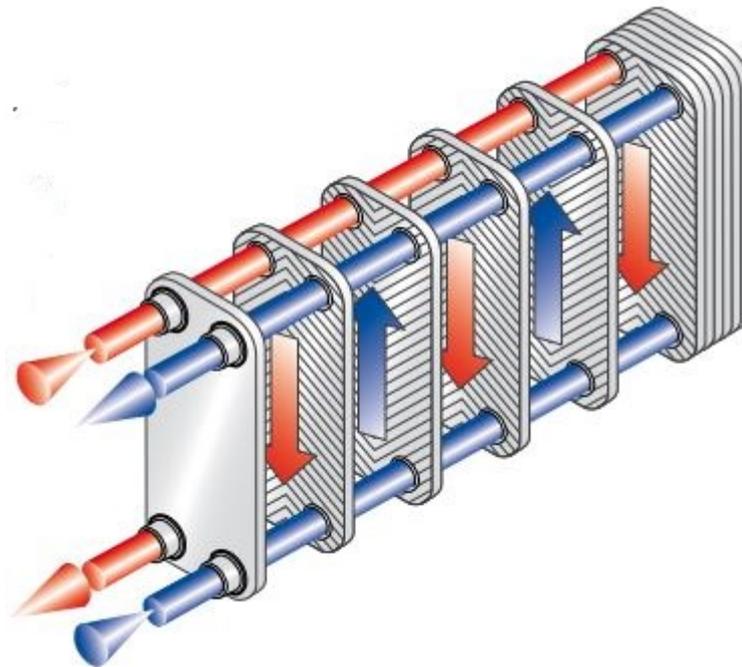


Figura 3.7: Funcionamiento del intercambiador de placas

El intercambiador utilizado es el GPLK-10 de la marca Funke [18]. Consta de 60 placas y tiene un volumen de 0,025 l/canal.

■ Termorregulador

Es el encargado de regular la temperatura del combustible que se ensaya. Para ello posee una cubeta de 4,5 litros a la que se le introduce glicol. Dentro de este baño se encuentran sumergidas una resistencia y una bomba de paletas.

Cuando se le asigna una temperatura objetivo en el display, la resistencia comienza a actuar y a calentar el líquido a la vez que la bomba empieza a hacerlo circular. El control de la temperatura en cascada PID es el que se encarga de ajustar la alimentación calefactora de forma automática a las necesidades del baño.

Esto significa que el termostato valora periódicamente si se ha alcanzado la temperatura objetivo y la resistencia deja de actuar en caso afirmativo.

La conexión del termostato y el intercambiador se realiza a través de tubos de plástico que se conectan a los racores de la bomba de paletas.

El termostato que se ha utilizado es el ME-4 de la marca Julabo [19](Figura 3.8). Este termostato es capaz de regular la temperatura de centésima en centésima.



Figura 3.8: Termostato utilizado en la instalación

■ Estructura de aluminio

Para garantizar la estabilidad del sistema y que todos los elementos de la instalación estuvieran organizados se diseñó y se montó una estructura hecha con perfiles de aluminio. La estructura está formada por una base rectangular de 30x40 cm, en la cual se levanta un marco de 30 cm de altura sobre el largo de la base (Figura 3.9).



Figura 3.9: Estructura de perfiles de aluminio

La bomba se atornilló con tres tornillos en una de las esquinas de la base. El tubo se sujetó con la ayuda de unas abrazaderas en un lado del marco que se levanta sobre la base. El intercambiador se situó en el lado superior del marco, sujetado por una chapa metálica diseñada a propósito y atornillada a dicho lado.

■ **Display de termopar**

Con el objetivo de conocer la temperatura que hay dentro del tubo para realizar las medidas de una manera precisa, se le ha introducido un sensor termopar.

El sensor está conectado a este display que muestra una lectura constante de la temperatura que hay dentro del tubo. La precisión del aparato es de una décima de °C.



Figura 3.10: Display lector de termopar

3.4. ADQUISICIÓN DE DATOS

Para que las medidas fueran válidas y correctas se tuvieron que realizar un conjunto de acciones, las cuales se detallan a continuación.

1. En primer lugar se introdujo en el caudalímetro de ultrasonidos algunos datos relevantes para que se pueda procesar la información que aportan los transductores. Alguno de estos datos son referidos al tubo como material, diámetro externo y espesor. Estos datos fueron medidos con los equipos de medida que posee el departamento. Y otros datos son referidos al combustible. Son densidad, viscosidad, y un rango aproximado de velocidad del sonido. Estas variables se obtuvieron del National Institute of Standards and Technology (NIST) [20], que posee una base de datos con las variables de una infinidad de fluidos.
2. Con estos datos introducidos, el siguiente paso era indicar el número de veces que se quiere que las ondas ultrasónicas atraviesen el tubo. De esta manera, si se introduce un número par los dos transductores deben estar en el mismo plano (Figura 3.11 (Izquierda)) y si se introduce un número impar deben estar contrapuestos (Figura 3.11 (Derecha)).



Figura 3.11: Izquierda: Transductores colocados en el mismo plano Derecha: Transductores colocados contrapuestos

Cuando se ha introducido el número de veces que las ondas atravesarán el tubo, el caudalímetro sugiere la distancia a la que se deben colocar para que no se produzcan medidas erróneas. Esta parte es muy importante, ya que a partir de 5 milímetros de discrepancia con la distancia sugerida se pueden producir errores graves en la medida. Por ello, se optó por colocar los transductores en el mismo plano para todas las medidas, es decir, uno encima del otro. De esta forma, la medida de la distancia a la que se colocan se puede realizar de una manera más correcta y colocarlos exactamente a la distancia que sugiere el equipo.

3. Cuando los transductores estuvieron colocados comenzó la campaña de medidas. El display del caudalímetro ya aportaba directamente una velocidad del sonido en cada una de las medidas. Es entonces cuando se ponía en funcionamiento el termorregulador, asignándole la temperatura objetivo. También se ponía en funcionamiento la bomba para que el combustible comenzara a circular. Cuando la temperatura que aportaba el termopar era de 25°C , primer punto de medida, se anotaba la primera medida. Después se esperaba 1 minuto y se volvía a tomar. De tal forma se obtuvieron 3 medidas en cada condición ensayada. Los puntos de medida que se tomaron fueron, desde 25°C , con incrementos de 5°C y hasta llegar a los 70°C .
4. Se realizaron un total de 2 medidas para cada combustible, realizadas en 2 días diferentes. La razón de esta metodología radica en comprobar la repetitividad de los resultados. Si se realizan las medidas en días diferentes y estas son parecidas significa que la metodología empleada es la correcta. Esto no sería así si se realizaran las medidas el mismo día, porque se puede estar cometiendo el mismo error varias veces.

Capítulo 4

Resultados

En este capítulo se van a presentar los resultados obtenidos de velocidad del sonido de los diferentes combustibles que han sido sometidos a ensayo. Se incluirán tablas de datos y gráficos donde se podrá observar la evolución de la velocidad del sonido en relación a la temperatura. Además, se incluirán comparaciones entre medidas, tanto en forma de gráfico como en forma de porcentaje de desviación, con el objetivo de determinar si el método utilizado es robusto y los resultados son semejantes en dos días diferentes. De la misma forma, se procederá con los valores teóricos de velocidad del sonido obtenidos del NIST, para comprobar si las medidas son precisas y se ajustan a la realidad.

4.1. ANÁLISIS DE REPETITIVIDAD

Con el objetivo de analizar si el método utilizado era sólido, se realizaron los ensayos en dos días diferentes. De esta forma, observando ambos ensayos se puede observar si existe repetitividad.

4.1.1. Dodecano

Se presentan en las tablas 4.1 y 4.3 los resultados de los dos ensayos que se realizaron con el combustible dodecano. Como se ha explicado anteriormente, se realizaron 3 registros de valores con un intervalo de 1 minuto en cada condición ensayada. En las tablas 4.2 y 4.4 también se muestran la media de los tres registros y la desviación típica.

Temperatura [°C]	Vel. sonido 1 [m/s]	Vel.sonido 2 [m/s]	Vel.sonido 3 [m/s]
25	1283,70	1283,30	1283,10
30	1266,20	1269,30	1268,40
35	1247,70	1249,80	1249,20
40	1232,89	1231,36	1232,34
45	1213,86	1210,83	1212,25
50	1194,75	1194,69	1193,15
55	1174,24	1175,58	1175,40
60	1159,85	1159,29	1158,76
65	1135,42	1136,21	1136,30
70	1120,63	1119,50	1118,50

Tabla 4.1: Ensayo Día 1 de dodecano

Temperatura [°C]	Media [m/s]	Desviación típica
25	1283,37	0,31
30	1267,97	1,59
35	1248,90	1,08
40	1232,20	0,78
45	1212,31	1,52
50	1194,20	0,91
55	1175,07	0,73
60	1159,30	0,55
65	1135,98	0,48
70	1119,54	1,07

Tabla 4.2: Ensayo Día 1 dodecano: Resultados estadísticos

Temperatura [°C]	Vel. sonido 1 [m/s]	Vel.sonido 2 [m/s]	Vel.sonido 3 [m/s]
25	1280,16	1279,44	1280,7
30	1264,32	1264,16	1265,54
35	1247,39	1246,72	1245,57
40	1230,14	1229,38	1230,46
45	1211,39	1211,7	1210,63
50	1190,47	1191,25	1193,15
55	1172,63	1174,68	1174,12
60	1152,69	1155,33	1155,95
65	1132,24	1134,65	1132,87
70	1118,96	1116,65	1116,86

Tabla 4.3: Ensayo día 2 de dodecano

Temperatura [°C]	Media [m/s]	Desviación típica
25	1280,1	0,63
30	1264,67	0,75
35	1246,56	0,92
40	1229,99	0,55
45	1211,24	0,55
50	1191,62	1,38
55	1173,81	1,06
60	1154,66	1,73
65	1133,25	1,25
70	1117,49	1,28

Tabla 4.4: Ensayo Día 2 dodecano: Resultados estadísticos

Para las dos medidas del dodecano, se puede ver que la desviación típica es muy pequeña. Esto se debe a que las medidas son muy parecidas entre ellas.

Para comprobar la repetitividad de los resultados en la tabla 4.5 se va mostrar la desviación en forma de porcentaje que hay entre ambos ensayos y en la Figura 4.1 se mostrará esta desviación de manera gráfica.

Temperatura [°C]	Medida 1 [m/s]	Medida 2 [m/s]	Error relativo [%]
25	1283,37	1280,1	0,25
30	1267,97	1264,67	0,26
35	1248,90	1246,56	0,19
40	1232,20	1229,99	0,18
45	1212,31	1211,24	0,09
50	1194,20	1191,62	0,22
55	1175,07	1173,81	0,11
60	1159,30	1154,66	0,40
65	1135,98	1133,25	0,24
70	1119,54	1117,49	0,38

Tabla 4.5: Error relativo entre medidas de dodecano

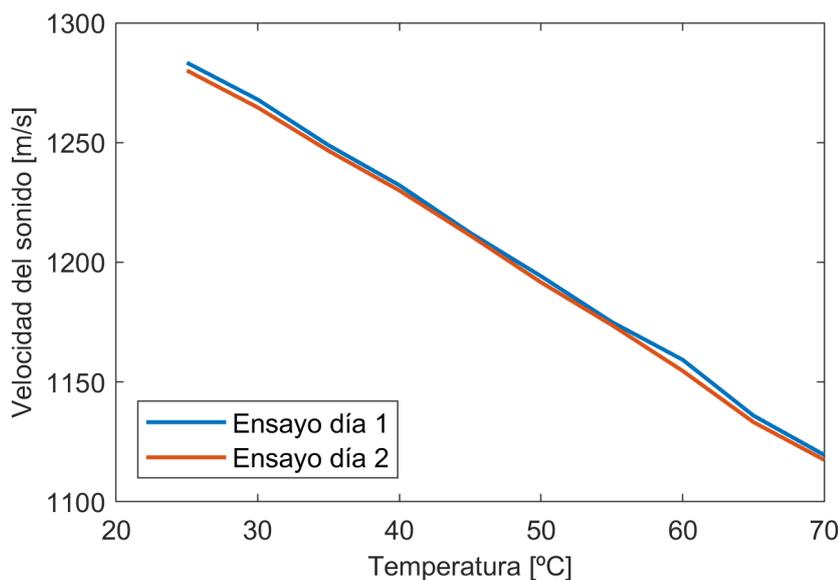


Figura 4.1: Representación gráfica de las medidas 1 y 2 de dodecano

Para el dodecano los resultados son prácticamente idénticos en ambas medidas. La repetitividad del método utilizado quedaría demostrada.

4.1.2. Heptano

Se presentan en las tablas 4.6 y 4.8 los resultados de los dos ensayos que se realizaron con el combustible heptano. Como en el caso del dodecano, se realizaron 3 registros de valores con un intervalo de 1 minuto en cada condición ensayada. Además también se muestra la media y la desviación típica de los 3 registros en las tablas 4.7 y 4.9.

Temperatura [°C]	Vel. sonido 1 [m/s]	Vel. sonido 2 [m/s]	Vel.sonido 3 [m/s]
25	1132,70	1132,98	1133,45
30	1124,80	1126,00	1125,15
35	1099,78	1100,05	1099,65
40	1076,96	1077,99	1077,73
45	1050,67	1051,25	1050,76
50	1029,75	1030,02	1030,11
55	1008,72	1008,56	1009,04
60	985,16	985,77	984,99
65	963,78	962,92	964,11
70	944,36	943,65	944,11

Tabla 4.6: Ensayo Día 1 de heptano

Temperatura [°C]	Media [m/s]	Desviación típica
25	1133,04	0,38
30	1125,32	0,62
35	1099,83	0,20
40	1077,56	0,54
45	1050,89	0,31
50	1029,96	0,19
55	1088,77	0,24
60	985,31	0,41
65	963,61	0,61
70	944,04	0,36

Tabla 4.7: Ensayo Día 1 heptano: Resultados estadísticos

Temperatura [°C]	Vel. sonido 1 [m/s]	Vel. sonido 2 [m/s]	Vel. sonido 3 [m/s]
25	1131,24	1132,68	1131,47
30	1111,33	1110,67	1109,88
35	1091,27	1090,46	1090,69
40	1074,37	1074,95	1073,44
45	1051,66	1049,97	1049,40
50	1030,12	1031,61	1030,86
55	1007,31	1008,04	1008,76
60	986,34	986,76	985,13
65	964,22	963,93	965,75
70	944,24	945,6	944,44

Tabla 4.8: Ensayo Día 2 de heptano

Temperatura [°C]	Media [m/s]	Desviación típica
25	1131,80	0,77
30	1110,73	0,73
35	1090,81	0,42
40	1074,25	0,76
45	1050,34	1,18
50	1030,86	0,75
55	1008,04	0,73
60	986,08	0,85
65	964,63	0,98
70	944,76	0,73

Tabla 4.9: Ensayo Día 2 heptano: Resultados estadísticos

De igual manera que en el heptano, se puede ver que la desviación típica es muy pequeña porque las medidas son muy parecidas entre ellas.

Para comprobar la repetitividad de los resultados, en la Tabla 4.10 se va mostrar de idéntica manera que con el dodecano la desviación en forma de porcentaje que hay entre ambos ensayos y en la Figura 4.2 se mostrará esta desviación de manera gráfica.

Temperatura [°C]	Medida 1 [m/s]	Medida 2 [m/s]	Error relativo [%]
25	1133,04	1131,80	0,11
30	1125,32	1110,63	1,31
35	1099,83	1090,81	0,82
40	1077,56	1074,25	0,31
45	1050,89	1050,34	0,05
50	1029,96	1030,86	0,09
55	1008,77	1008,04	0,07
60	985,31	986,08	0,08
65	963,60	964,63	0,11
70	944,04	944,76	0,08

Tabla 4.10: Error relativo entre medidas de heptano

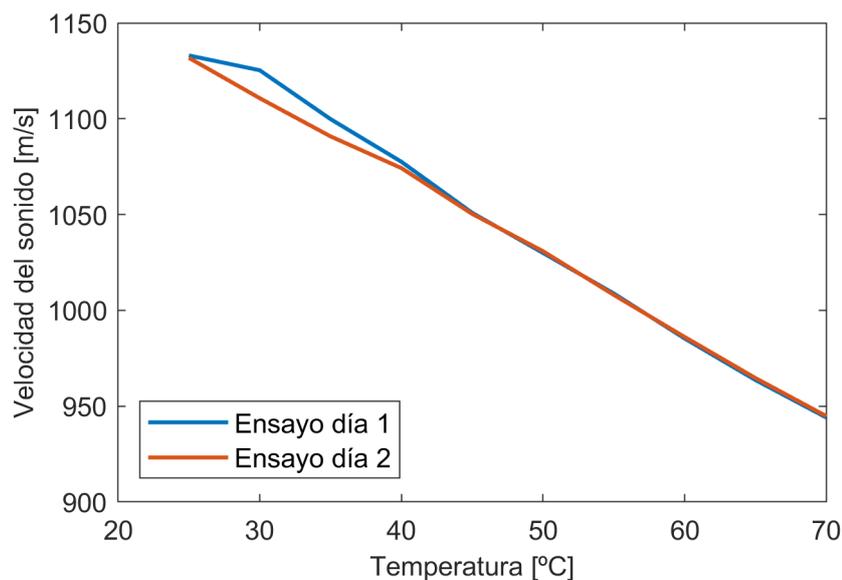


Figura 4.2: Representación gráfica de las medidas 1 y 2 de heptano

En este caso sí que es apreciable una desviación en cuanto a repetitividad se refiere. Mientras que el ensayo del día 2 se parece bastante a una recta (la velocidad del sonido se comporta de forma lineal con la temperatura), el ensayo del día 1 sufre una desviación que lo hace más diferente a una recta. Evidentemente el resultado del día 2 es más fiable, y es posible que el fallo en la medida del día 1 estuviera en una mala regulación de la temperatura.

4.2. VALIDACIÓN DE LOS RESULTADOS

En este apartado se analiza la validez de los resultados obtenidos. Para ello se compara con la base de datos del NIST, que es una base de datos contrastada y fiable. Unos resultados reales deberían parecerse bastante a los datos del NIST.

4.2.1. Dodecano

Para comparar los valores experimentales con los valores teóricos del dodecano se ha calculado el valor experimental como la media aritmética entre el ensayo del Día 1 y el ensayo del Día 2. Estos valores se muestran en la Tabla 4.11 y se representan en la Figura 4.3.

Temperatura [°C]	Valor experimental [m/s]	Valor NIST [m/s]	Error [%]
25	1281,73	1280,91	0,06
30	1266,32	1260,95	0,42
35	1247,73	1241,26	0,52
40	1231,10	1221,85	0,75
45	1211,78	1202,69	0,75
50	1192,91	1183,78	0,77
55	1174,44	1165,10	0,80
60	1156,98	1146,64	0,89
65	1134,62	1128,39	0,55
70	1118,52	1110,34	0,73

Tabla 4.11: Error respecto a valores teóricos de dodecano

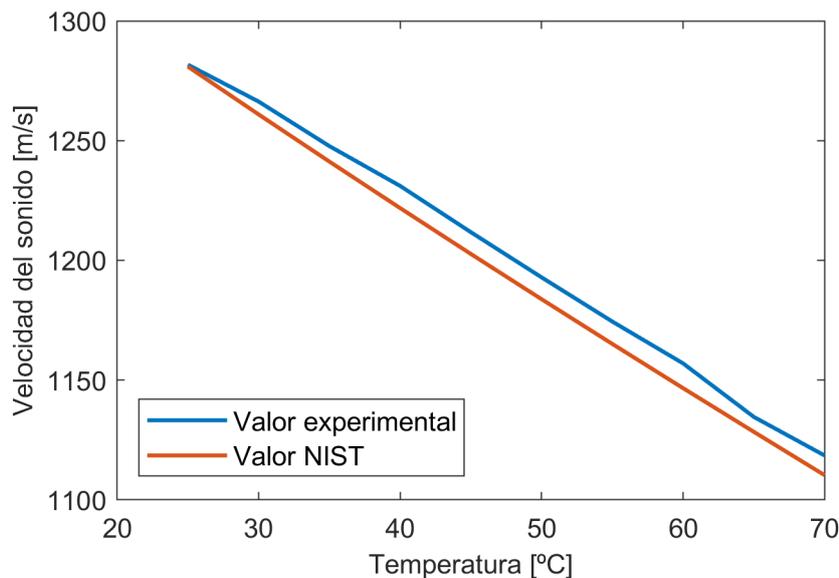


Figura 4.3: Representación gráfica del valor experimental frente al valor del NIST en el dodecano.

En la Figura 4.3 se aprecia una discrepancia entre el valor experimental y el valor teórico. Pero es verdad que esta discrepancia es mínima y se puede deber a limitaciones de los equipos de medida.

4.2.2. Heptano

De igual forma que con el dodecano, es necesario hacer una comparación entre los valores experimentales y los valores teóricos obtenidos del NIST. Para ello se ha calculado el valor experimental como la media aritmética entre el ensayo del Día 1 y el ensayo del Día 2. Estos datos se muestran en la tabla 4.12 y se representan en la figura 4.4

Temperatura [°C]	Valor experimental [m/s]	Valor NIST [m/s]	Error [%]
25	1132,42	1128,53	0,34
30	1117,97	1107,81	0,92
35	1095,32	1087,22	0,74
40	1075,91	1066,75	0,86
45	1050,62	1046,40	0,40
50	1030,41	1026,15	0,42
55	1008,41	1005,99	0,24
60	985,63	985,93	0,02
65	964,12	965,93	0,19
70	944,40	946,00	0,17

Tabla 4.12: Error respecto a valores teóricos de heptano

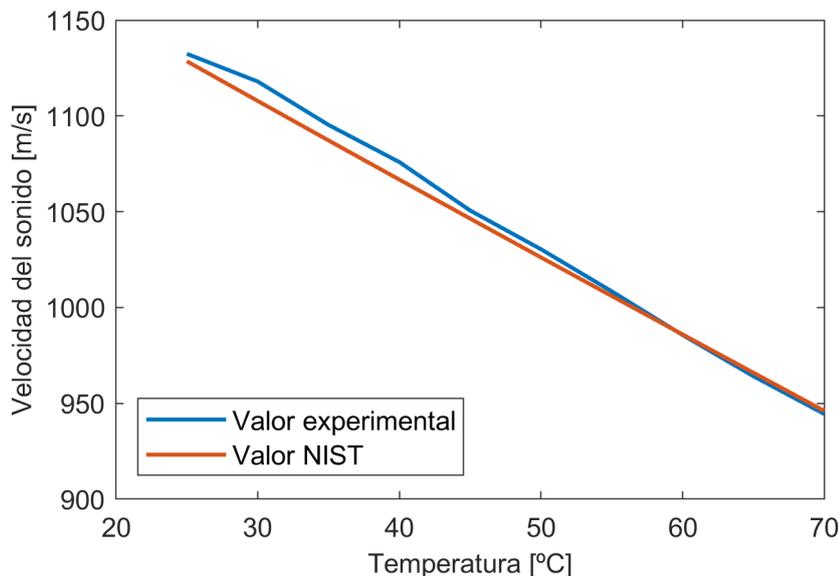


Figura 4.4: Representación gráfica de los valores experimentales con los valores del NIST

En este caso los resultados son mejores que los del dodecano. Las diferencias entre el valor teórico y el valor experimental son menores. Esto puede significar que la precisión

esté relacionada con la densidad, ya que el heptano tiene menos cadenas de carbono que el dodecano. Esta hipótesis no se ha podido comprobar debido a que no ha sido posible medir con más combustibles a causa de un fallo del sello mecánico de la bomba de la Figura 3.6, y que finalmente no se ha podido reparar.

Capítulo 5

Propuesta para dispositivo de alta presión

Con la instalación que se ha descrito en el capítulo de *Montaje experimental* se puede medir la influencia de la temperatura en la velocidad del sonido. Dicho montaje tiene algunas limitaciones como la temperatura máxima de operación, que son 70 °C.

Pero la limitación más importante es la imposibilidad de presurizar el combustible y no poder medir la influencia de la presión en la velocidad del sonido también. Tal y como se indicó en el capítulo 2, en el inyector se alcanzan altas presiones y es importante conocer la manera en la que se comporta la velocidad del sonido en unas condiciones de presión similares a las que se dan en condiciones de inyección. Por ello, se ha decidido calcular y diseñar un dispositivo al que se le pueda introducir combustible y poder presurizarlo, además de poder variarle la temperatura.

Este dispositivo funcionará con un nuevo equipo de ultrasonidos, de la marca Olympus. Este equipo es más nuevo y preciso que el utilizado en el presente TFG, y el DMMT lo podrá utilizar en un futuro. Sus transductores tienen una rosca que se puede enroscar al dispositivo, algo en lo que hay que basarse para hacer el diseño, que además también debe considerar que la señal se transmite axialmente a diferencia del equipo que el departamento ya poseía.

5.1. DESCRIPCIÓN DEL DISPOSITIVO

5.1.1. Elementos Del Dispositivo

El sistema está formado por una pieza cilíndrica con un orificio pasante de base a base en el centro. A esta pieza cilíndrica se le colocan dos tapas de manera que el dispositivo queda completamente cerrado (Figura 5.1).

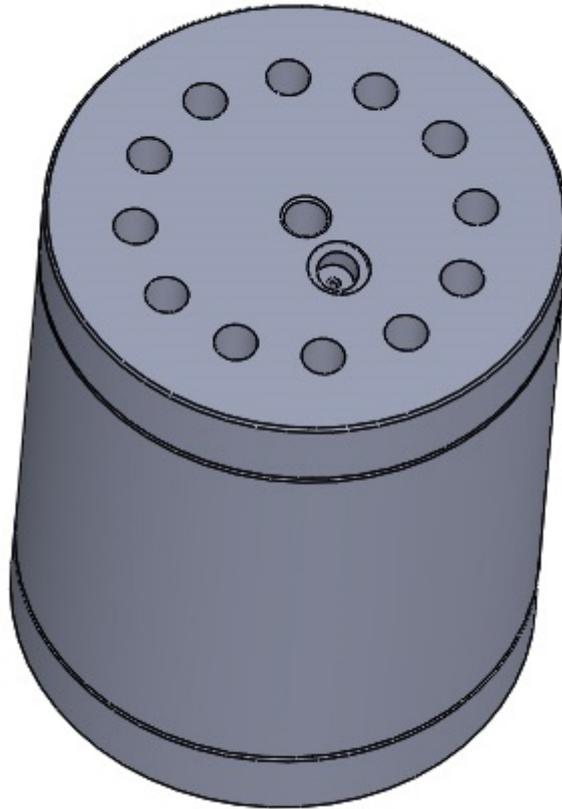


Figura 5.1: Maqueta completa a alta presión

Para garantizar el cierre , se han colocado tornillos que soporten las presiones y las fuerzas que se generen. En la parte central de las tapas se le ha puesto una rosca, en la cual irán enroscados los transductores del nuevo equipo de ultrasonidos, véase en la Figura 5.2. En dicha figura se puede ver claramente donde estarán colocados los transductores y, marcada en rojo, está señalada cuál sería la dirección de la señal ultrasónica. En esta misma figura también se representa la situación de los tornillos que sujetan las tapas. Por último, se ve claramente cuál es la sección de medida, es decir, la parte del dispositivo que finalmente contendrá al combustible sujeto de ser ensayado

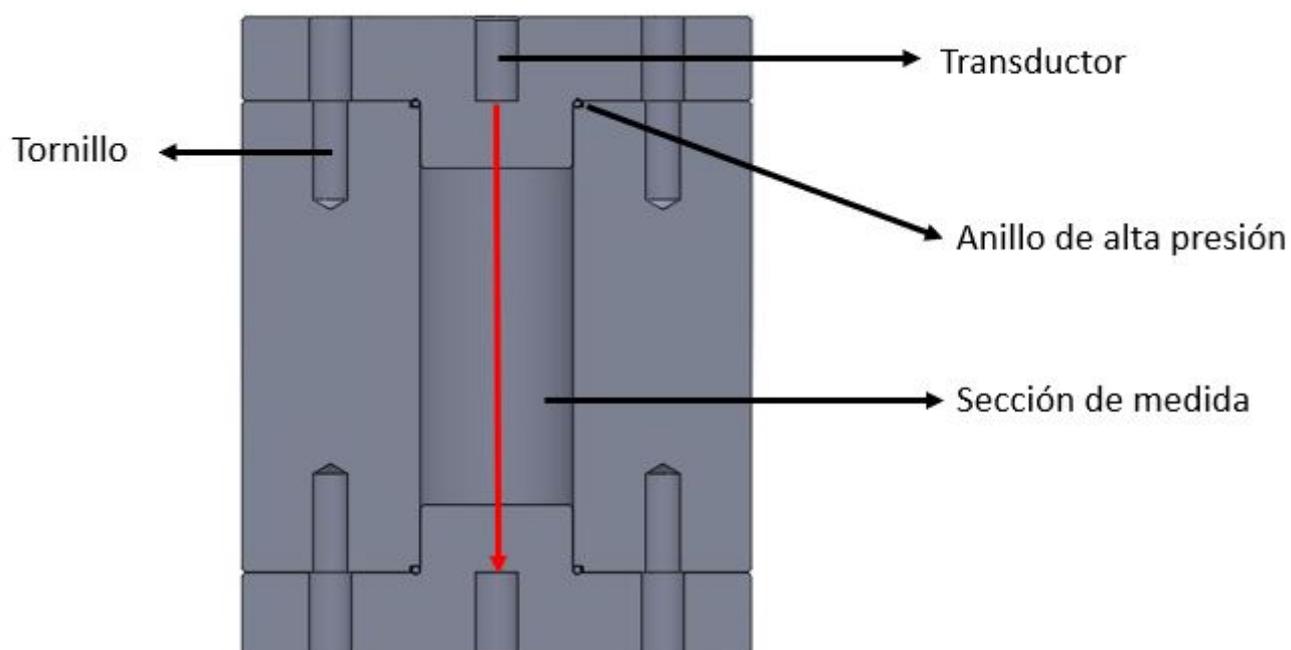


Figura 5.2: Vista de sección de la maqueta

El llenado y presurización se lleva a cabo a través de una de las tapas. Para ello se ha colocado una conexión de alta presión formada por una rosca, un cono y un conducto que llega hasta la parte central inferior de la tapa. Esto se puede observar en la Figura 5.3, que es una sección concreta que no pasa por el centro de la pieza pero que permite ver la conexión. Dicha conexión se ha colocado de manera inclinada, debido a razones de espacio y que la conexión de alta presión no puede tener codos ni giros. Por ello, ha sido necesario hacer un chaffán, ya que no se puede enroscar una rosca inclinada desde la parte superior.

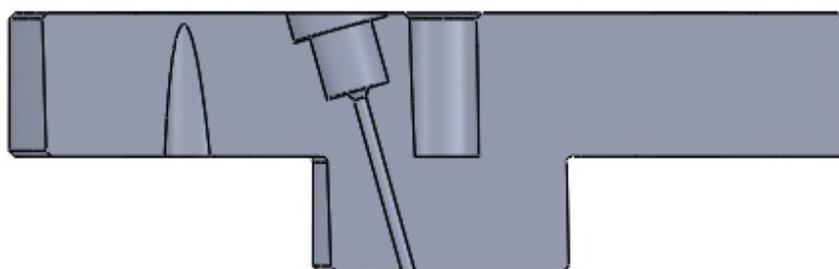


Figura 5.3: Vista de la conexión de alta presión

Los tornillos garantizan el cierre del dispositivo, es decir, que las tapas no se abran cuando se presurice el combustible. Pero no aseguran el sellado del mismo, no aseguran

que la presión que se esté generando no se pierda por fugas entre la pieza cilíndrica y las tapas. Para solucionar este problema, se ha decidido colocar un anillo de alta presión que estará situado en una cavidad específica con las medidas correctas para su buen funcionamiento. La cavidad y la situación de los anillos de presión se pueden ver en la Figura 5.3.

5.1.2. Material

El material elegido para el dispositivo es el acero inoxidable dúplex 2205 (X2CrNiMoN). Se trata de un acero mejorado con nitrógeno. Este acero se creó para mejorar los problemas de corrosión que afectan a la serie 300 de inoxidable. No es completamente austenítico pero tampoco es ferrítico. Contiene aproximadamente 50 % de ferrita y 50 % de austenita.

Con esta estructura, este tipo de acero posee las mejores características de los aceros ferríticos (alta resistencia mecánica) y los aceros austeníticos (buena resistencia a corrosión).

La aleación está formada por un 22 % de cromo, 3 % de molibdeno, 5 % a 6 % de níquel y nitrógeno. Sus principales ventajas son:

- Mayor resistencia mecánica que los aceros inoxidables estándar.
- Alta resistencia a corrosión por fatiga bajo presión.
- Muy buena resistencia a corrosión uniforme.
- Menor expansión térmica que los aceros inoxidables austeníticos.
- Mayor conductividad térmica.
- Buena resistencia a erosión.

Por todo lo mencionado, este tipo de acero se ajusta a la perfección a los requerimientos del sistema. Por un lado podrá aguantar las altas presiones y fuerzas que se generarán, y por el otro, no debe de tener ningún problema en términos de oxidación y de corrosión.

5.2. CÁLCULO DE TORNILLOS

Como ya se ha mencionado el dispositivo tiene dos tapas. Para asegurar que estas estén bien sujetas y puedan aguantar la presión en su sitio se deben colocar una serie de tornillos. Es importante dimensionar el número de tornillos que hacen falta y su métrica para que se asegure un buen cierre del dispositivo y que no se produzca ningún fallo de apertura ni de rotura de tornillos.

5.2.1. Planteamiento Del Cálculo

Para realizar el cálculo se han utilizado una serie de coeficientes de seguridad que el dispositivo debe cumplir para su correcto funcionamiento. Los coeficientes son los representados a continuación:

1-Factor de seguridad de apertura: Es el que asegura que las tapas no se abran.

$$X_{apertura} = \frac{F_{pretensado}}{F_{ext}} * \frac{K_c + K_b}{K_c} \quad (5.1)$$

En la ecuación 5.1:

-La fuerza de pretensado representa la fuerza que se le aplica al tornillo cuando se aprieta y se obtiene de la ecuación 5.2.

-Fext (Fuerza exterior) es la fuerza que se genera en cada tornillo al estar sometido a presión. Se obtiene de la ecuación 5.3.

-Kb es la rigidez del tornillo y se obtiene de la ecuación 5.4.

-Kc es la rigidez de la mariz y se obtiene de la ecuación 5.9.

$$F_{pretensado} = \frac{M}{K * D} \quad (5.2)$$

En la ecuación 5.2:

- M representa el par de apriete.

-K es el factor del par torsor lubricado. En este caso vale 0,18.

-D es la métrica de los tornillos utilizados.

$$F_{ext} = \frac{P * A_P}{N_{tornillos}} \quad (5.3)$$

En la ecuación 5.3:

-P es la presión a la que está sometido el dispositivo. Es de 150 bar.

-Ap representa la sección del cilindro que está sometido a presión.

-Ntornillos es el número de tornillos que se han utilizado.

$$K_b = \frac{1}{K_d} + \frac{1}{K_t} \quad (5.4)$$

En la ecuación 5.4:

-Kd representa la rigidez de la caña del tornillo. Se calcula con la ecuación 5.8.

-Kt es la rigidez de la rosca. Se obtiene de la ecuación 5.5.

$$K_t = \frac{A_R * E}{L_{utiltornillo}} \quad (5.5)$$

En la ecuación 5.5:

-Ar es el área de esfuerzo de la rosca. Se calcula a través de la ecuación 5.6.

-E representa el límite elástico del material que se haya elegido para fabricar el dispositivo.

-La longitud útil roscada es la longitud de la rosca que está soportando los esfuerzos.

$$A_R = \frac{\pi}{4 \left(\frac{D_{menor} + D_{paso}}{2} \right)^2} \quad (5.6)$$

$$L_{utiltornillo} = b + t + \frac{D}{2} \quad (5.7)$$

En la ecuación 5.7:

-b representa el espesor de la tapa.

-t representa es espesor de la arandela.

$$K_d = \frac{\pi * L_{utilcaña}}{4 * D^2 * E} \quad (5.8)$$

En la ecuación 5.8:

- Lutilcaña=0, porque el tornillo no tiene caña. En consecuencia, Kd también valdrá 0.

$$K_c = \frac{(0.5774 * \pi * E * D)(0,5774 * L_{utiltornillo} + 2,5 * D)}{2 \ln(5 * (0,5774 * L_{utiltornillo} + 0,5 * D))} \quad (5.9)$$

2-Longitud roscada mínima por diámetro: es aconsejable que sea menor de 0,5 y en ningún caso mayor que 1. En caso contrario los filetes de los tornillos se podrían romper.

$$L = \frac{L_{rosca}}{D} \quad (5.10)$$

En la ecuación 5.22 :

-Lrosca representa la longitud de la rosca y se calcula con la ecuación 5.11.

$$L_{rosca} = N_{filmin} * Paso \quad (5.11)$$

En la ecuación 5.11:

-Nfilmin es el número de filetes mínimo y se calcula con la ecuación 5.12.

-Paso es el paso de rosca del tornillo.

$$Númerofiletesmínimo = \frac{1}{Ncortante1filetematriz} \quad (5.12)$$

En la Ecuación ??:

-Ncortante 1 filete matriz es la fuerza cortante que soporta un filete.

$$Ncortante1filetematriz = \frac{0,577 * E}{S_{sba}} \quad (5.13)$$

En la ecuación 5.13:

-Ssba es la tensión a cortadura del filete de la matriz y se calcula con la ecuación 5.14.

-E es el módulo elástico del material utilizado.

$$S_{sba} = \frac{F_{bt}}{A_{ba}} \quad (5.14)$$

En la ecuación 5.14:

-Fbt es la fuerza a tracción del tornillo y se calcula con la ecuación 5.15.

-Aba es el área de cortadura del filete de a matriz y se calcula con la ecuación 5.16.

$$F_{bt} = F_{pretensado} + F_{ext} * \frac{K_b}{K_b + K_c} \quad (5.15)$$

$$A_{ba} = \pi * D * 0,88 * Paso \quad (5.16)$$

3-Factor de seguridad de tornillos (Fuerza externa):

$$X_{FE} = \frac{(E_{tornillo} * A_R - F_{pret})(K_b + K_c)}{F_{ext} * K_b} \quad (5.17)$$

4-Factor de seguridad de tornillos (Fuerza total).

$$X_{FT} = \frac{F_{max}}{F_{bt}} \quad (5.18)$$

En la ecuación 5.24:

-Fmax es la fuerza máxima soportada por el tornillo y se calcula con la ecuación 5.19.

$$F_{max} = A_{minima} * E_{tornillo} \quad (5.19)$$

En la ecuación 5.19:

-Amínima es el área menor de entre el área de esfuerzo de la rosca (ecuación 5.6) y la ecuación 5.20.

$$A = \frac{\pi}{4 * D^2} \quad (5.20)$$

El objetivo del cálculo es realizar una iteración con las variables que se pueden cambiar hasta llegar a una solución en la que se cumplan con los 4 factores de seguridad descritos anteriormente. Dichas variables son:

- Material utilizado (Límite elástico). La elección del material utilizado también ha dependido en gran medida del cálculo por elementos finitos.
- Número de tornillos
- Par de apriete
- Métrica de los tornillos
- Diámetro interno del dispositivo
- Espesor de la tapa

Hay otras variables que se han asignado como variables de obligado cumplimiento:

- Presión a la que está sometido el dispositivo: 150 bar.
- Factor del par torsor lubricado : 0,18
- Calidad del tornillo 8.8 (Límite elástico= 640 MPa)
- Espesor de la arandela (t) = 1 mm

5.2.2. Solución Adoptada

Tras realizar varias iteraciones y probar algunas combinaciones de parámetros se ha decidido optar por la siguiente solución:

- Material utilizado (Límite elástico) = Acero dúplex 2205 (X2CrNMoN)(límite elástico 450 MPa).
- Número de tornillos = 12 tornillos
- Par de apriete = 70 Nm
- Métrica de los tornillos = 12
- Diámetro interno del dispositivo = 45 mm
- Espesor de la tapa = 20 mm

Habiendo determinado todos estos parámetros, los resultados de los coeficientes se muestran a continuación.

$$X_{apertura} = 2,033 \quad (5.21)$$

$$L = 0,352mm \quad (5.22)$$

$$X_{FE} = 5,463 \quad (5.23)$$

$$X_{FT} = 1,484 \quad (5.24)$$

Como se puede observar es un resultado bastante conservador en el que los tornillos tienen un amplio coeficiente de seguridad que hará que no se rompan, y tampoco se producirá fallo por apertura.

5.3. CÁLCULO CON ELEMENTOS FINITOS

Es necesario garantizar que tanto el diseño que se ha hecho como el material que se ha utilizado cumplan con los requerimientos de las presiones y las tensiones que se generarán al ensayar. Por ello, se ha realizado un cálculo con elementos finitos haciendo uso del programa SolidWorks. Este cálculo se ha realizado principalmente por dos razones:

- Verificar la validez de los cálculos hechos en el apartado 5.2, ya que permite detectar potenciales errores.
- Comprobar cuales son las partes del dispositivo más solicitadas mecánicamente y tener una estimación de la deformación del mismo.

En el cálculo, se ha tratado por separado las 3 piezas que forman el dispositivo: tapa de llenado, pieza principal y tapa inferior.

Para realizar este estudio se requiere de hacer unos cálculos previos que tienen relación con el cálculo de tornillos realizado en el apartado anterior.

En primer lugar la fuerza que existe en el tornillo es la fuerza a tracción (F_{bt}), calculada en el apartado anterior.

$$F_{tornillo} = F_{bt} \quad (5.25)$$

En segundo lugar, los tornillos están generando una fuerza sobre la tapa del dispositivo y sobre la pieza principal en la misma dirección, en la dirección del tornillo. Esta fuerza se calcula con la Ecuación 5.26.

$$F_{caras} = N_{tornillos} * (F_{bt} - F_{ext}) \quad (5.26)$$

Por lo que la fuerza que genera cada tornillo viene dada por la Ecuación 5.27.

$$F = F_{caras} / N_{tornillos} \quad (5.27)$$

Las fuerzas que se acaban de calcular se colocan en la simulación con elementos finitos de la siguiente manera:

- $F_{tornillo}$ se coloca en las roscas de la pieza principal hacia afuera y en las arandelas de las tapas, hacia dentro.

- F se coloca en la parte inferior de las tapas, en dirección contraria a $F_{tornillo}$.

- F_{caras} se coloca en las dos bases de la pieza principal, de tal forma que están en sentido contrario entre ellas.

Una vez realizados estos cálculos, ya se tienen todos los datos para introducirlos en SolidWorks y extraer los resultados. Para el cálculo hay un proceso de mallado bastante automatizado, y la malla se ha refinado hasta tal punto que los resultados son independientes de la misma.

-Pieza principal:

Para reducir el coste computacional, la pieza principal se ha dividido en 12 partes iguales haciendo uso de su simetría. Además también se ha podido dividir por el plano medio del cilindro, lo que hace que se haya dividido finalmente en 24 partes iguales. En la Figura 5.4 se representa la tensión de Von Mises de la pieza principal.

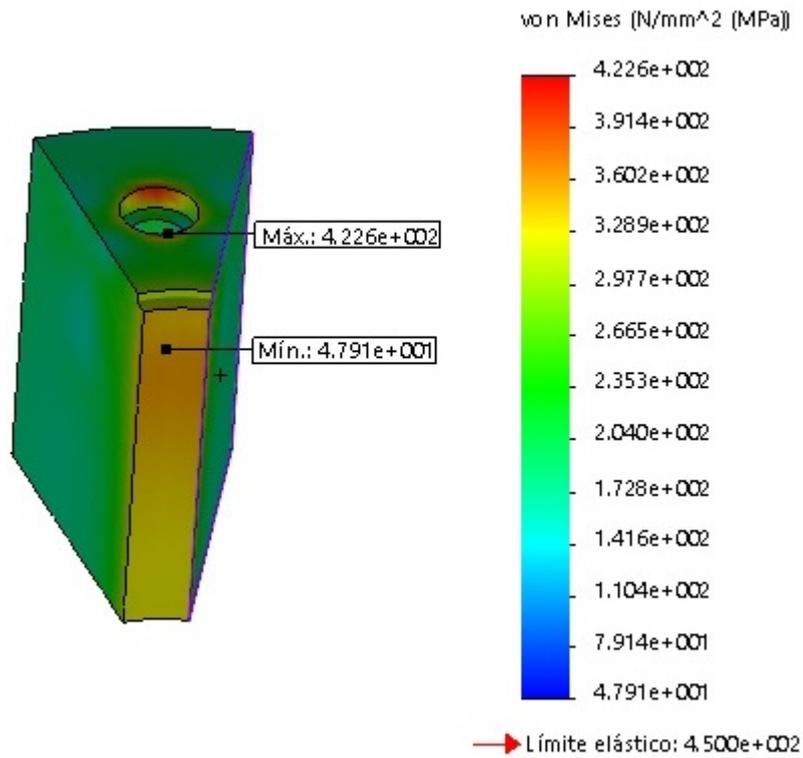


Figura 5.4: Tensión de Von Mises en la pieza principal

En dicha figura se puede ver que las sollicitaciones son mayores en el orificio central, donde el combustible está presurizado a 150 bar. Esto no debe acarrear problemas porque en ningún caso se supera el límite elástico, la pieza cumple con las especificaciones mecánicas.

-Tapa de llenado

En el caso de la tapa de llenado la simulación se ha tenido que hacer íntegra. No se ha podido dividir en partes iguales debido a la ausencia de simetría provocada por la conexión de alta presión presente en la Figura 5.3. De esta forma, se presenta la tensión de Von Misses de la tapa de llenado en la Figura 5.5 (Vista inferior) y en la Figura 5.6 (Vista superior).

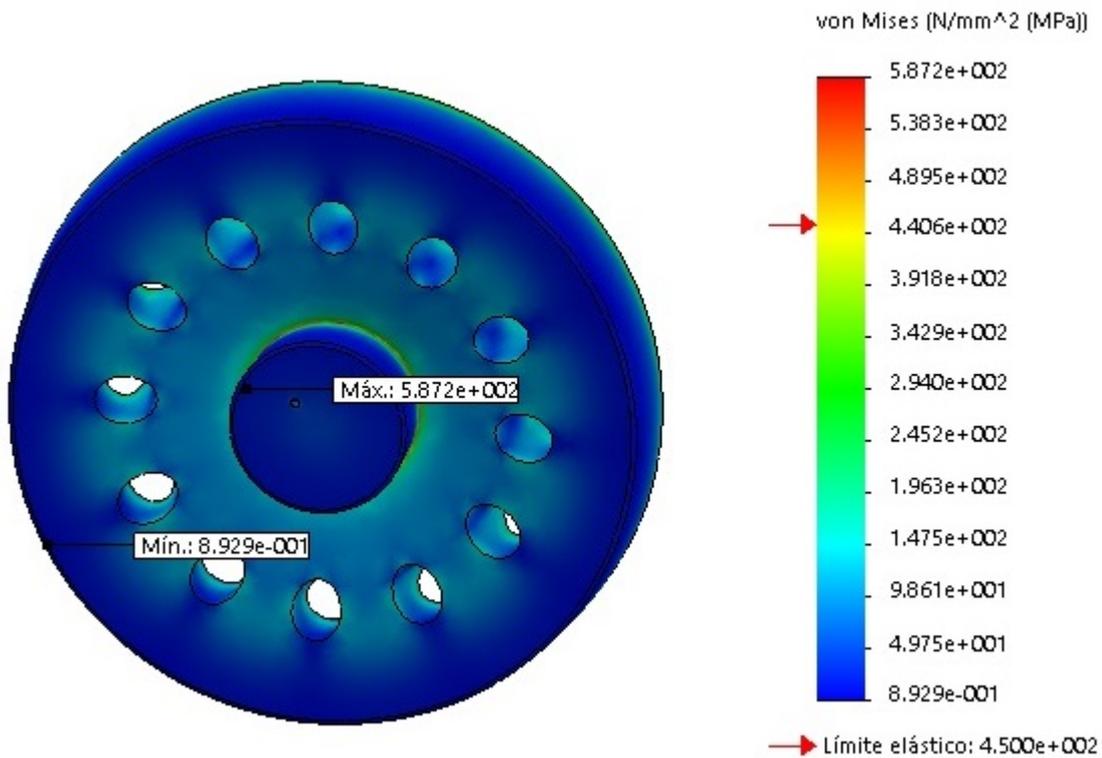


Figura 5.5: Tensión de Von Mises en la tapa de llenado. Vista inferior.

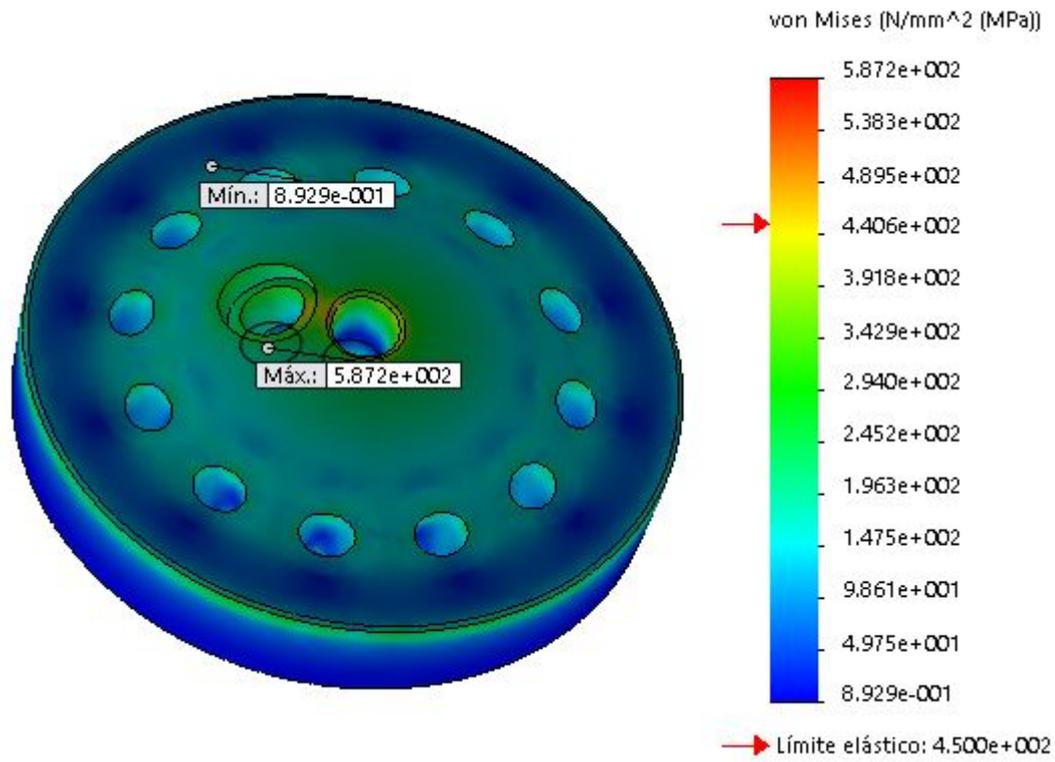


Figura 5.6: Tensión de Von Mises en la tapa de llenado. Vista superior.

En este caso se puede observar que en el cambio de diámetro de la pieza hay una zona en la que se sobrepasa el límite elástico. Se da el diseño por válido porque la zona afectada es mínima y además trabaja a compresión. Este diseño no se rompería, pero sí sufriría una pequeña deformación. Esto es algo común en los diseños a alta presión. La realidad es que este diseño fallaría a fatiga, después de muchos ciclos, algo que no debe de ser preocupante porque este diseño no se ensayará más de 100 veces.

-Tapa inferior

De igual manera que la pieza principal la tapa inferior es simétrica, por lo que se ha dividido en 12 partes para simplificar el cálculo y reducir el coste computacional. Se presenta la tensión de Von Mises de la tapa inferior en la Figura 5.7 (Vista inferior) y en la Figura 5.8 (Vista superior).

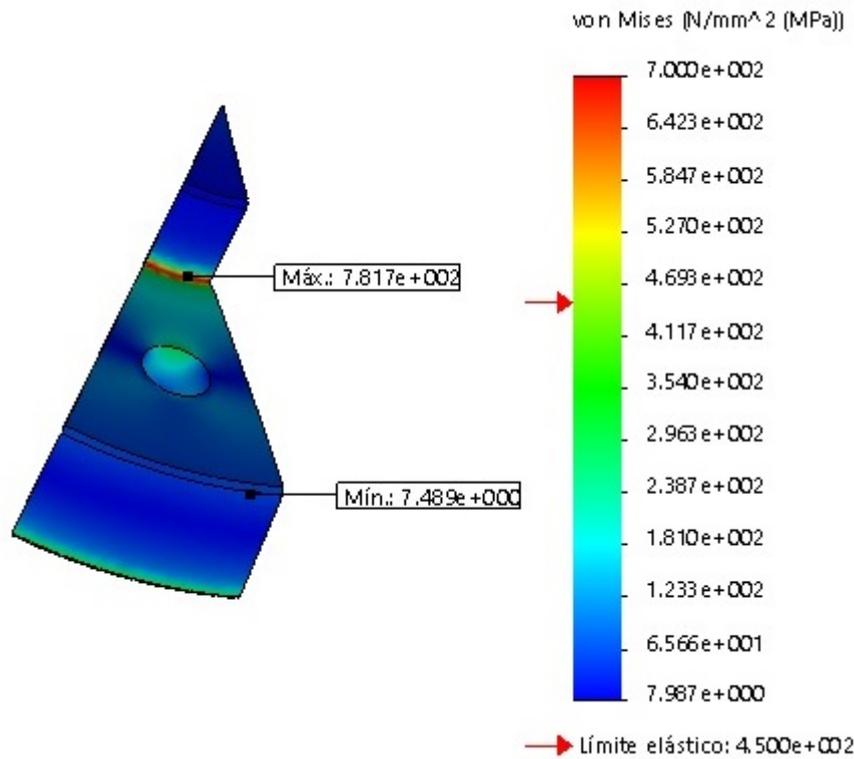


Figura 5.7: Tensión de Von Mises en la tapa inferior. Vista inferior.

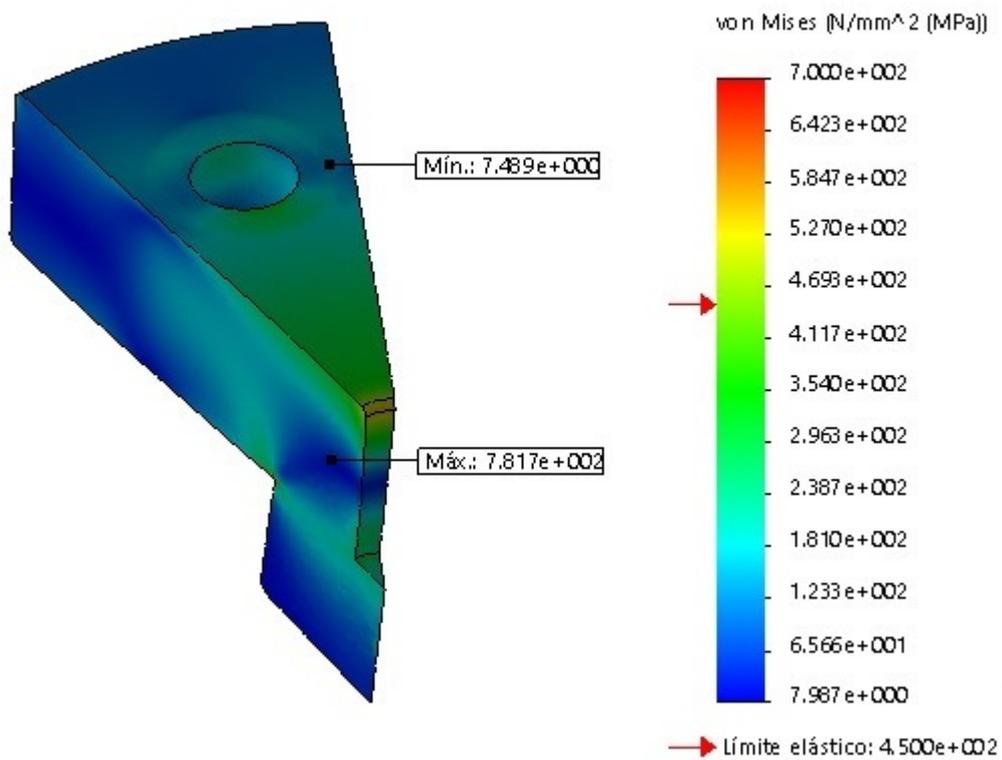


Figura 5.8: Tensión de Von Mises en la tapa inferior. Vista superior.

A esta pieza le ocurre lo mismo que a la tapa de llenado, hay una zona afectada que es mínima en el cambio de diámetro donde se sobrepasa el límite elástico. Como la zona afectada es mínima, se asume que se pueda deformar porque no se producirá fallo y cumplirá su función.

Capítulo 6

Conclusiones y trabajos futuros

En este capítulo se señalan las conclusiones que se han extraído de la realización del presente trabajo final de grado.

- Ha sido posible realizar un nuevo montaje de una instalación para la caracterización de la velocidad del sonido con ultrasonidos. Se ha ideado la manera en la que se debía variar la temperatura de los combustibles ensayados, así como la correcta ubicación de todos los componentes en la instalación.
- Se ha realizado una campaña de medidas de una manera rigurosa. Para ello se han realizado unas pruebas previas de validación, donde se ha comprobado que el caudalímetro de ultrasonidos usado era apto para ser utilizado en las medidas y se ha determinado cuál es la manera correcta de colocar los transductores para que los resultados fueran lo más reales posibles.
- Se ha caracterizado experimentalmente la velocidad del sonido de diferentes combustibles a presión ambiente y con una temperatura variable. Esto ha contribuido a aportar conocimientos de los materiales y combustibles que se han utilizado en el laboratorio.
- Se han adquirido nuevas competencias y se han utilizado recursos y conocimientos que ya se poseían. Entre las nuevas competencias cabe destacar el aprendizaje partiendo desde cero de los programas SolidWorks y LaTeX. Además se ha mejorado en el uso de algunos recursos que a se conocían como MatLab. Estas competencias trascienden de este trabajo de fin de grado y serán muy útiles en el futuro profesional.
- Se ha diseñado haciendo uso del programa informático SolidWorks una maqueta para la determinación experimental de la velocidad del sonido a presión variable.

Para ello, además del diseño se han realizado los cálculos pertinentes que aseguren que la maqueta cumpla su función correctamente y no se produzcan fallos que comprometan la validez de las medidas o la seguridad del usuario, ya que está sometida a grandes presiones.

- Este trabajo ha permitido concluir los estudios de Grado de Ingeniería Mecánica de la Universidad Politécnica de Valencia y conocer de primera mano la línea de Inyección del Departamento de Máquinas y Motores Térmicos.

Haciendo uso de este proyecto como punto de partida se van a exponer una serie de tareas que se deben de realizar en el futuro y que harán posible una mejora en el estudio de la velocidad del sonido haciendo uso del principio de medida de los ultrasonidos.

- Fabricar la maqueta diseñada valiéndose de los planos que se aportan en este trabajo.
- Realizar la calibración y validación del nuevo equipo de ultrasonidos que se usará para la nueva maqueta diseñada. Para ello primero medirá en la maqueta a temperatura y presión ambiente. Y si funciona como se espera se procederá a medir a temperatura y presión variable. Esto proporcionará una gran mejora a este proyecto porque las presiones de medida serán más parecidas a las que se producen en los sistemas de inyección, y la temperatura podrá superar los 70°C a los que se limitaba este trabajo.

Bibliografía

- [1] Francisco Payri González and José M^a Desantes Fernández. Motores de combustión interna alternativos. *Colección Académica. Editorial UPV*, 2011.
- [2] Albeiro Burago. <http://albeirobuitrago.blogspot.com.html>, Visitado el 20 de Mayo de 2019.
- [3] Marcos Carreres Talens. *Thermal Effects Influence on the Diesel Injector Performance through a Combined 1D Modelling and Experimental Approach* Universitat Politècnica de València Departamento de Máquinas y Motores Térmicos. PhD thesis, Universitat Politècnica de València, 2016.
- [4] S. J. Ball and J. P.M. Trusler. Speed of sound of n-hexane and n-hexadecane at temperatures between 298 and 373 K and pressures up to 100 MPa. *International Journal of Thermophysics*, 22(2):427–443, 2001.
- [5] Piotr Kiełczyński, Marek Szalewski, Andrzej Balcerzak, Krzysztof Wieja, Aleksander J. Rostocki, and Ryszard M. Siegoczyński. Ultrasonic evaluation of thermodynamic parameters of liquids under high pressure. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 62(6):1122–1131, 2015.
- [6] Desconocido. <https://www.yumpu.com/es/.../fluxus>, Visitado el 24 de Abril de 2019.
- [7] Bosch Automovil. <http://es.bosch-automotive.com/es/internet/.html>, Visitado el 4 de Abril de 2019.
- [8] R. Payri, J. M. García, F. J. Salvador, and J. Gimeno. Using spray momentum flux measurements to understand the influence of diesel nozzle geometry on spray characteristics. *Fuel*, 84(5):551–561, 2005.
- [9] Dennis L. Siebers. Liquid-Phase Fuel Penetration in Diesel Sprays. *SAE Technical Paper Series*, 1(724), 2010.
- [10] Mustafa E. Tat, Jon H. Van Gerpen, Seref Soyly, Mustafa Canakci, Abdul Monyem, and Samuel Wormley. Speed of sound and isentropic bulk modulus of biodiesel at 21 °C from atmospheric pressure to 35 MPa. *JAOCs, Journal of the American Oil Chemists' Society*, 77(3):285–289, 2000.

- [11] Magín Lapuerta, John R. Agudelo, Matthew Prorok, and André L. Boehman. Bulk modulus of compressibility of diesel/biodiesel/HVO blends. *Energy and Fuels*, 26(2):1336–1343, 2012.
- [12] Boban D. Nikolić, Breda Kegl, Saša D. Marković, and Melanija S. Mitrović. Determining the speed of sound, density, and bulk modulus of rapeseed oil, biodiesel, and diesel fuel. *Thermal Science*, 16(SUPPL.2):505–514, 2013.
- [13] J. L. Daridon, A. Lagrabette, and B. Lagourette. Speed of sound, density, and compressibilities of heavy synthetic cuts from ultrasonic measurements under pressure. *Journal of Chemical Thermodynamics*, 30(5):607–623, 1998.
- [14] Maria J. Dávila and J. P. Martin Trusler. Thermodynamic properties of mixtures of N-methyl-2-pyrrolidinone and methanol at temperatures between 298.15 K and 343.15 K and pressures up to 60 MPa. *Journal of Chemical Thermodynamics*, 41(1):35–45, 2009.
- [15] El Hadji Ibrahima Ndiaye, Jean Patrick Bazile, Djamel Nasri, Christian Bonned, and Jean Luc Daridon. High pressure thermophysical characterization of fuel used for testing and calibrating diesel injection systems. *Fuel*, 98:288–294, 2012.
- [16] Fotos Peleties and J. P. Martin Trusler. Viscosity of liquid di-isodecyl phthalate at temperatures between (274 and 373) K and at pressures up to 140 MPa. *Journal of Chemical and Engineering Data*, 56(5):2236–2241, 2011.
- [17] Rover Pompe . <http://www.roverpompe.com/>, Visitado el 18 de Febrero de 2019.
- [18] Funke. <https://www.funke.de/de/>, Visitado el 13 de Mayo de 2019.
- [19] Julabo. <https://www.julabo.com/es/productos/termostatos-de-circulacion/>, Visitado el 17 de Abril de 2019.
- [20] National Institute of Standards and Technology (NIST) . <https://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/>, Visitado el 2 de Mayo de 2019.

Documento II

PRESUPUESTO

Índice de documento

1 Persupuesto

1.1. Introducción	69
1.2. Metodología de cálculo	69
1.2.1. Mano De Obra	69
1.2.2. Materiales	71
1.2.3. Elementos Fungibles	71
1.2.4. Herramientas Informáticas	72
1.2.5. Amortizaciones	72
1.3. Resumen del presupuesto	73

Capítulo 1

Persupuesto

1.1. INTRODUCCIÓN

Es necesario realizar un análisis económico de los elementos que conforman el presente proyecto. Para ello, el mismo se ha desglosado en coste de la mano de obra, coste de los materiales que se han adquirido, coste de elementos fungibles y coste de herramientas informáticas . No todos los recursos utilizados se han adquirido específicamente para este proyecto, ya que el DMMT ya los poseía. Por ello es necesario tener en cuenta también las amortizaciones. Como resultado, la suma de los cinco apartados conformarán el presupuesto total del proyecto.

1.2. METODOLOGÍA DE CÁLCULO

En este apartado se explica de una manera detallada la manera en la que se han obtenido los presupuestos parciales de los cinco apartados mencionados anteriormente : mano de obra, materiales, elementos fungibles, herramientas informáticas y amortizaciones.

1.2.1. Mano De Obra

El objetivo es identificar la retribución anual y horaria de todas las personas que se han involucrado en el proyecto. Para ello se analizarán las horas de mano de obra dedicadas y el coste por hora que supone.

Hay que señalar que el número de horas empleadas por el autor del trabajo que se han contabilizado , son solamente las horas que equivalen a los créditos asignados al TFG. Por otra parte, el número de horas empleadas por el resto del personal se han obtenido de manera aproximada.

Así, el número de horas que se ha contabilizado que ha empleado el autor, se muestran en la Tabla1.1.

Concepto	Cuantía	Unidades
Créditos del TFG	12	créditos
Carga de trabajo	25	horas/crédito
Carga total	$12 \times 25 = 300$	horas

Tabla 1.1: Cálculo de horas empleadas por el autor

En la Tabla 1.2 se muestra la estimación de horas que ha empleado el personal que se ha involucrado en el proyecto.

Concepto	Cuantía	Unidades
Autor	300	horas
Profesor ayudante doctor	45	horas
Técnico de laboratorio	20	horas

Tabla 1.2: Horas empleadas por cada persona implicada en el proyecto

Al igual que el número de horas empleadas, es necesario mostrar los salarios del personal, véase la Tabla 1.3. Los salarios se han obtenido de las retribuciones base oficiales para Personal de Investigación (PDI) de la Universidad Politécnica de Valencia en el curso 2018-2019. Estos salarios solamente contemplan el salario base, no se añade ningún tipo de complemento.

1.1.

Concepto	Cuantía	Unidades
Autor	0	€/mes
Profesor ayudante doctor	25725,64	€/año
Técnico de laboratorio	24500	€/año

Tabla 1.3: Salarios de cada persona implicada en el proyecto

Teniendo ya toda esta información, es necesario asignar el coste por hora del personal. Para ello se debe saber que la jornada laboral oficial del departamento estipula que el personal hace un total de 40 horas por semana y que trabaja 46 semanas al año. Con esta información y utilizando la Ecuación 1.1 se puede calcular cuánto cobra el personal por cada hora trabajada.

$$c.p.h \left[\frac{\text{€}}{\text{hora}} \right] = \text{salariobrutoanual} \left[\frac{\text{€}}{\text{año}} \right] \times \frac{1}{46} \left[\frac{\text{año}}{\text{semanas}} \right] \times \frac{1}{40} \left[\frac{\text{semana}}{\text{horas}} \right] \quad (1.1)$$

De esta forma en la Tabla 1.4 se muestra el coste por hora de del personal involucrado en el proyecto y en la Tabla 1.5 se muestra el coste total de cada uno.

Concepto	Cuantía	Unidades
Autor	0	€/hora
Profesor ayudante doctor	13,98	€/hora
Técnico de laboratorio	13,31	€/hora

Tabla 1.4: Coste por hora del personal involucrado en el proyecto

Cantidad	Unidad	Descripción	Precio	Importe
300	horas	Autor	0	0
45	horas	Profesor ayudante doctor	13,981	629,15
20	horas	Técnico de laboratorio	13,31	266,30
Subtotal mano de obra				895,45

Tabla 1.5: Coste de la mano de obra

1.2.2. Materiales

En ese apartado se exponen los precios de los materiales de nueva adquisición que han servido para la realización del proyecto. Se presenta en la Tabla 1.6.

Cantidad	Unidad	Descripción	Precio [€]	Importe [€]
3	ud	Latiguillos	20	60
1	ud	Bomba	134	134
1	ud	Intercambiador de calor	217	217
1	ud	Tubo de acero inoxidable	130	130
1	ud	Termopar + cable	10	10
1	ud	Chapa sujeción	25	25
7	ud	Perfiles de aluminio	10	70
1	ud	Racoraje	35	35
2	ud	Abrazaderas	15	30
Subtotal materiales				711

Tabla 1.6: Coste de los materiales

1.2.3. Elementos Fungibles

Se llama elemento fungible a aquel que tras su uso no puede volver a ser utilizado.

Uno de los elementos fungibles es el consumo de electricidad. Para analizar este aspecto se estima un precio de 0,12 €/KWh. Además también se asume un rendimiento del 100%. Los elementos que han consumido energía eléctrica han sido el ordenador portátil personal y la instalación de medida de velocidad del sonido, en concreto bomba y termorregulador. El coste del consumo eléctrico puede verse en la Tabla 1.7.

Por otro lado, otro elemento fungible que se ha utilizado es el glicol del termorregulador que servía para calentar el combustible ensayado. El coste total de los elementos fungibles puede verse en la Tabla 1.8.

Elemento	Potencia [kW]	Cantidad [h]	Consumo [€]
Ordenador portátil	0.45	300	14,85
Instalación	4	50	24
Total consumo eléctrico			38,85

Tabla 1.7: Coste del consumo eléctrico

Cantidad	Unidad	Descripción	Precio [€]	Importe [€]
4,5	litros	Glicol	6	27
-	-	Consumo eléctrico	-	38,85
Subtotal E.fungibles				73,39

Tabla 1.8: Coste de los elementos fungibles

1.2.4. Herramientas Informáticas

Tanto para el diseño del dispositivo de alta presión, como para la generación de gráficas y el almacenamiento de datos ha sido necesario utilizar programas informáticos que tienen licencias y acarrear costes. No es necesario calcular la amortización, porque las licencias solamente tienen validez por un año. En la Tabla 1.9 se muestra cual ha sido el coste de las licencias de los programas informáticos.

Cantidad	Unidad	Descripción	Precio [€]	Importe [€]
1	ud	SolidWorks	1500	1500
1	ud	MatLab	800	800
1	ud	Microsoft Office	70	70
Subtotal H. informáticas				2370

Tabla 1.9: Coste de las herramientas informáticas

1.2.5. Amortizaciones

Se entiende por amortización la depreciación de un bien por su uso o por el paso del tiempo. Por ello, se debe contabilizar la pérdida de valor de los elementos que no se han tenido que comprar pero que sí se han usado.

El cálculo de las amortizaciones se han realizado por el método lineal a través de la Ecuación 1.2.

$$a = \frac{V_c - V_r}{n} \quad (1.2)$$

- V_c es el valor de compra del equipo.

- V_r es el valor residual del equipo.

-n es el periodo de amortización, es decir, el tiempo que se estima que el equipo debe estar funcionando.

Además, la Ecuación 1.3 representa la tasa horaria, lo que se deprecia el bien cada hora. En ella h son las horas trabajadas. Como se trabajan 40 horas a la semana y el ejercicio laboral del departamento tiene 46 semanas, las horas trabajadas son 1840 horas.

$$th = \frac{a}{h} \quad (1.3)$$

En la Tabla 1.10 se representa el cálculo de las amortizaciones y la tasa horaria

Elemento	Valor de compra [€]	Valor residual [€]	Vida útil [años]	Tasa horaria [€/hora]
Ordenador personal	500	15 %	5	0,046
Termorregulador	3500	10 %	10	0,171
Caudalímetro de ultrasonidos	4500	10 %	10	0,220
Display termopar	120	5 %	10	0,006

Tabla 1.10: Tabla de cálculo de amortizaciones y tasa horaria

Habiendo calculado ya la tasa horaria, en la Tabla 1.11 se muestran los costes derivados de las amortizaciones.

Cantidad	Unidad	Descripción	Precio [€]	Importe [€]
300	horas	Ordenador personal	0,046	13,86
30	horas	Termorregulador	0,171	21,36
50	horas	Caudalímetro ultrasonidos	0,220	11,00
30	horas	Display termopar	0,006	0,16
Subtotal amortizaciones				46,39

Tabla 1.11: Coste de las amortizaciones

1.3. RESUMEN DEL PRESUPUESTO

En la Tabla 1.12 se muestra el presupuesto total del proyecto. Hay que señalar que el porcentaje asignado al IVA solo influye en el coste de la mano de obra, ya que es la única parte que no lo tiene incluido todavía.

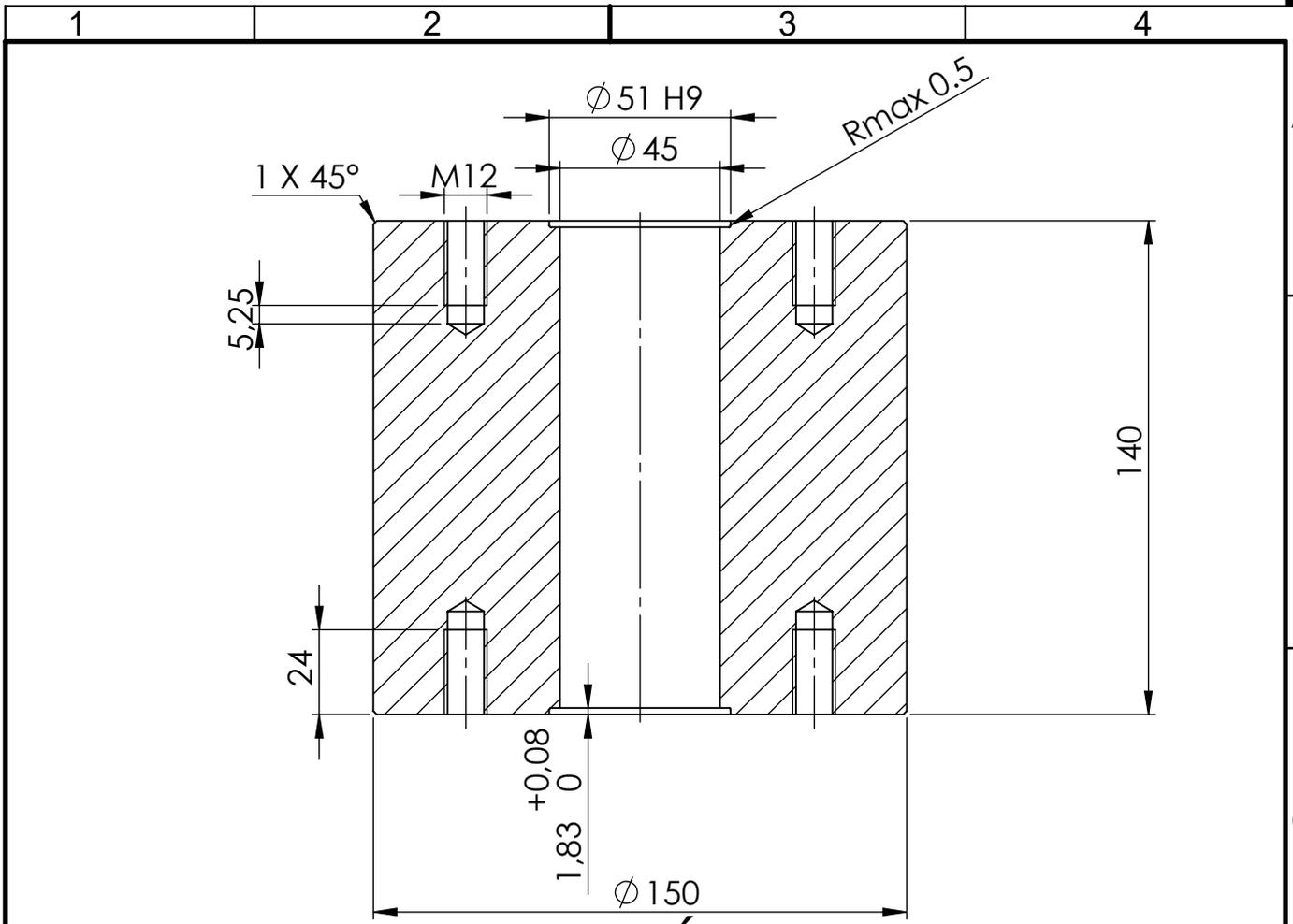
	IMPORTE [€]
Coste de la mano de obra	895,45
Coste de los materiales	711
Coste de elementos fungibles	73,39
Coste de herramientas informáticas	2370
Coste de amortizaciones	46,39
SUBTOTAL	4313,23
Gastos generales (10 %)	431,32
TOTAL NETO	4744,55
IVA (21 %)	188,04
TOTAL	4715,59

Tabla 1.12: Presupuesto total del proyecto

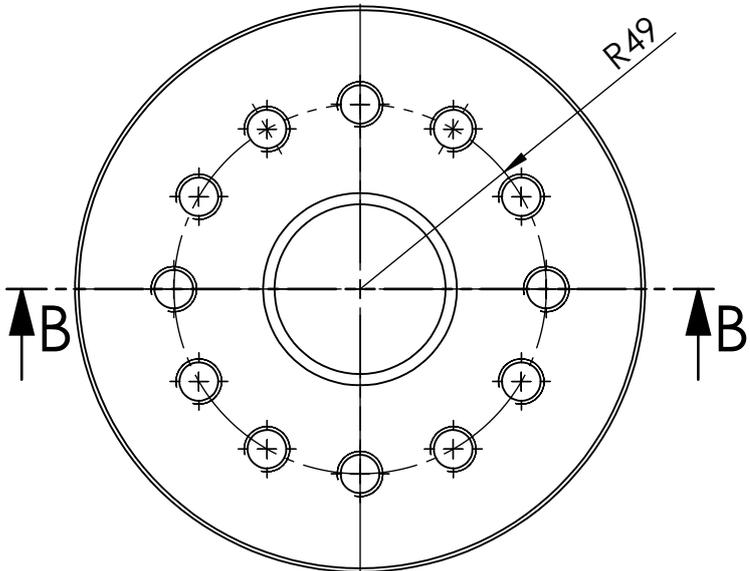
De esta manera el presupuesto total del proyecto asciende a **CUATRO MIL SE-
TECIENTOS QUINCE CON CINCUENTA Y NUEVE CÉNTIMOS**

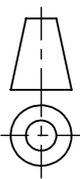
Documento III

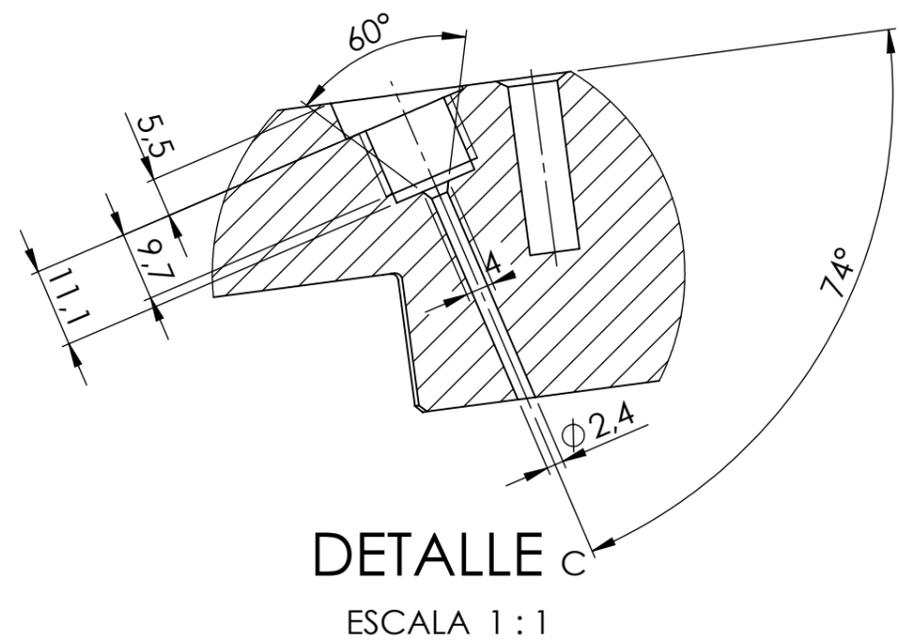
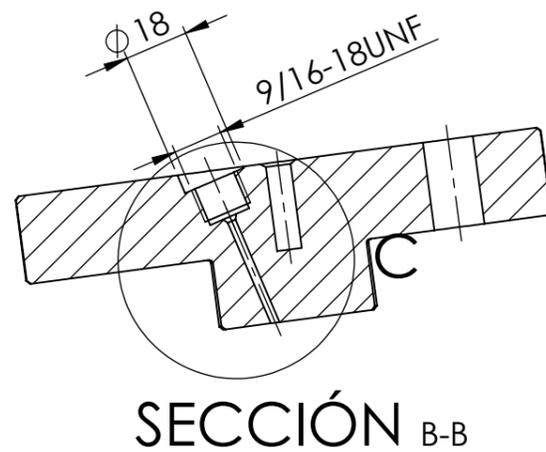
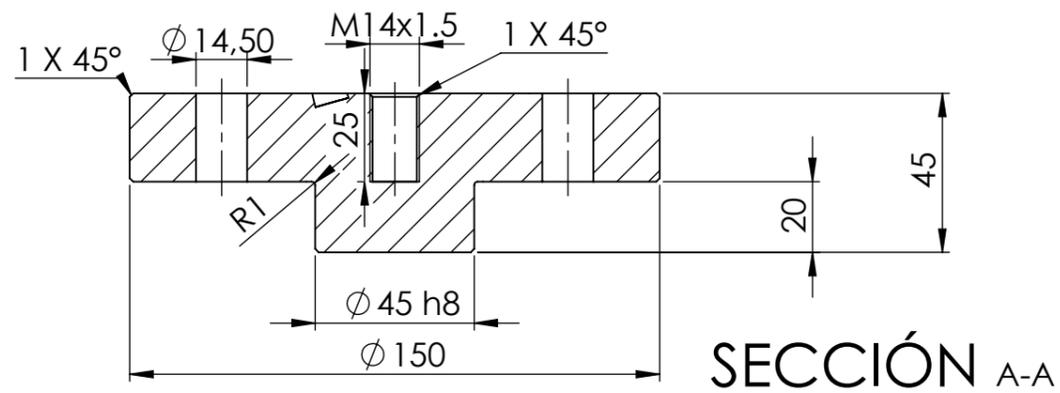
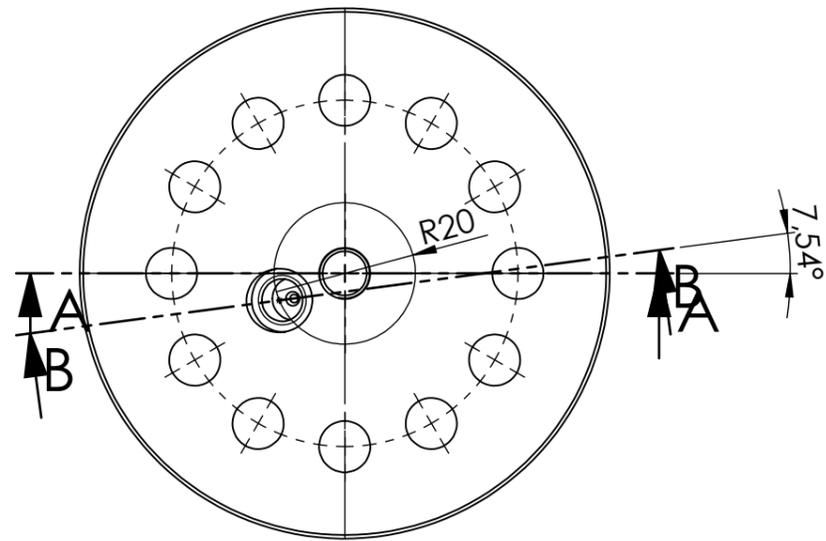
PLANOS



SECCIÓN B-B
ESCALA 1 : 2



 <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: Plano de pieza	Creado por: Álvaro Gallega Gómez	Fecha: 10/04/2019
		Si no se especifica lo contrario: Unidades en: mm Tolerancia Linear: ±0.2 Angular: ±0.2° Acabado superficial: N9	Aprobado por: José Enrique Del Rey	Descripción: Pieza principal
Cantidad: 1	Material: Acero Dúplex 2205	Referencia: 1	Revisión: 2	Hoja: 1 de 3
Linea Inyección A4	Escala: 1:2			



 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: Plano de pieza	Creado por: Álvaro Gallega Gómez	Fecha: 10/04/2019
	Si no se especifica lo contrario: Unidades en: mm Tolerancia Linear: ± 0.2 Angular: $\pm 0.2^\circ$ Acabado superficial: N9	Aprobado por: José Enrique Del Rey	14/04/2019
Linea Inyección A3 Escala: 1:2	Cantidad: 1 Material: Acero Dúplex 2205	Referencia: 2	Revisión: 2 Hoja: 2 de 3

1

2

3

4

A

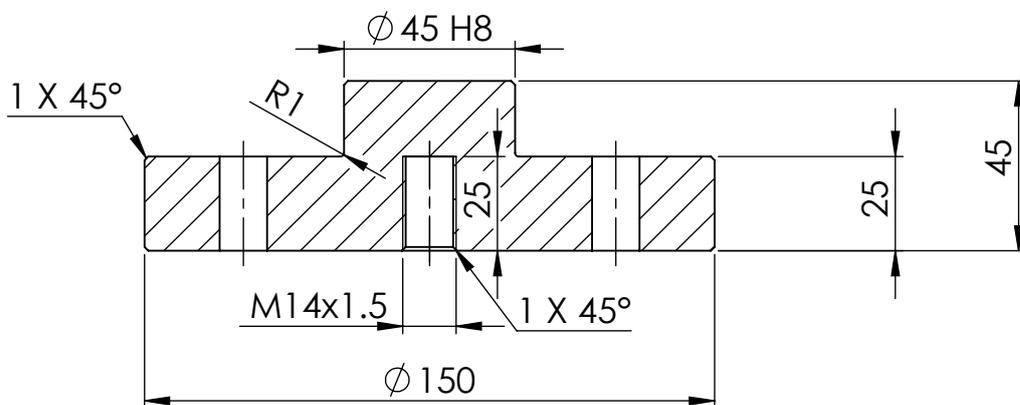
B

C

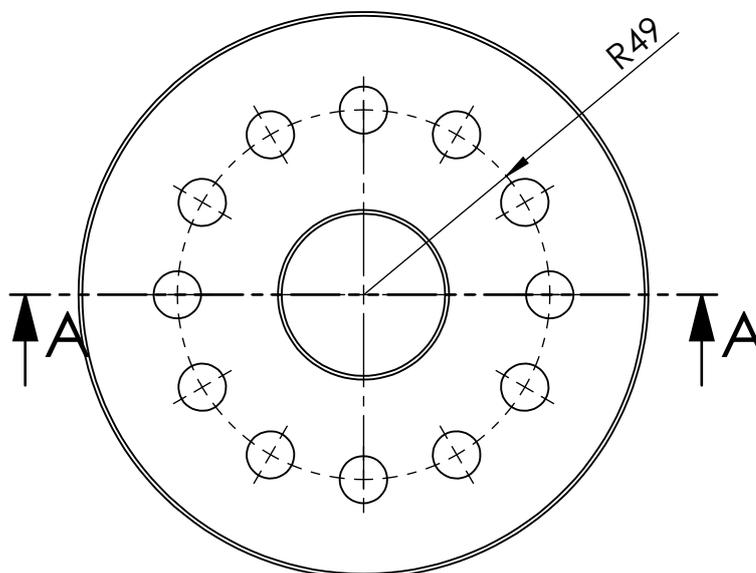
D

E

F



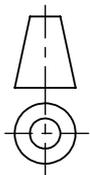
SECCIÓN A-A



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



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



Tipo de documento:

Plano de pieza

Si no se especifica lo contrario:

Unidades en: mm

Tolerancia

Linear: ± 0.2 Angular: $\pm 0.2^\circ$

Acabado superficial: N9

Creado por:

Álvaro Gallega Gómez

Aprobado por:

José Enrique del Rey

Description:

Tapa inferior

Fecha:

10/04/2019

14/04/2019

Cantidad:

1

Material:

Acero Dúplex 2205

Referencia:

3

Revisión:

2

Hoja:

3 de 3

Linea Inyección

A4

Escala: **1:2**

