



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



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

TRABAJO DE FIN DE GRADO

CALIBRACIÓN DE UNA INSTALACIÓN EXPERIMENTAL PARA LA
DETERMINACIÓN DE LA VISCOSIDAD DE COMBUSTIBLES DE
AUTOMOCIÓN EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA.

Para la obtención del Grado en Ingeniería Mecánica

Presentado por:

Javier Sendra Martín

Dirigido por:

Marcos Carreres Talens

Valencia, 25 de enero de 2019

Me gustaría agradecer, en primer lugar, a mi tutor Marcos Carreres Talens, por su predisposición a prestar ayuda y por su confianza depositada en mi.

También quiero mostrar gratitud a todos los miembros del Departamento de Máquinas y Motores Térmicos que han participado o ayudado en la realización del proyecto, en especial al técnico José Enrique Del Rey García.

Y por último, el ámbito personal quiero agradecer a mi familia y amigos por haber estado siempre a mi lado dispuestos a ayudarme.

Índice general

Índice general	V
Índice de figuras	VII
DOCUMENTO I MEMORIA	1
1 Planteamiento	5
1.1. Introducción	5
1.2. Antecedentes	5
1.3. Justificación y Objetivos	7
1.4. Viabilidad	8
1.5. Estructura del proyecto	8
2 Fundamento Teórico	11
2.1. El proceso de inyección en motores diésel	11
2.2. Reología	14
2.3. Viscosidad	15
2.4. Influencia de la viscosidad en el proceso de inyección	18
2.5. Técnicas reométricas	27
3 Materiales	37
3.1. Descripción del sistema	37
3.2. Desglose del sistema	37
4 Calibración	53
4.1. Introducción	53
4.2. Procedimiento	54
4.3. Postprocesado	55
5 Resultados	65
5.1. Introducción	65
5.2. Pasos para la construcción de la recta de calibración	65
5.3. Resultados	66

5.4. Conclusiones	68
5.5. Propuestas para el futuro	69
Bibliografía	71
DOCUMENTO II PRESUPUESTO	75
1 Introducción	79
1.1. Introducción	79
1.2. Metodología de cálculo del presupuesto	79
1.3. Justificación de los costes	80
1.4. Coste total	84

Índice de figuras

1.1. Departamento de Máquinas y Motores térmicos de la UPV	6
2.1. Esquema descriptivo del sistema common rail. [1]	12
2.2. Esquema de un inyector piezoeléctrico. [2]	13
2.3. Funcionamiento de un inyector de tipo solenoide. [3]	14
2.4. Curva de flujo de los distintos tipos de fluidos [5]	17
2.5. Pérdidas de carga en función del número de Reynolds [6]	19
2.6. Evolución del coeficiente de descarga en función del número de Reynolds para un orificio de aristas rectas. [?]	20
2.7. Evolución de las características del flujo al ser inyectado. [8]	20
2.8. Diferentes regímenes de atomización en función de tres números adimensionales [9]	22
2.9. Representación de los regímenes de atomización. [9]	22
2.10. Regímenes de atomización [3]	23
2.11. Curva de fluidez para representar la viscosidad dinámica y aparente [10] . .	24
2.12. Viscosidad dinámica de fluidos comunes en función de la temperatura. [11]	27
2.13. Movimiento de la aguja del inyector en función del tiempo. [12]	28
2.14. Viscosímetro capilar. [13]	28
2.15. Perfil de velocidades del flujo en el interior del tubo. [14]	29
2.16. Tipos de viscosímetro rotacional. [5]	31
2.17. Viscosímetro Höppler. [15]	31
2.18. Variación del coeficiente de descarga en función del número de Reynolds. [20]	35
3.1. Representación esquemática de la instalación [21]	38
3.2. Plano del tubo interior.	39
3.3. Diseño y planos del tubo exterior y sus correspondientes tapas. [27]	40
3.4. Esquema de las juntas de presión tipo MOV. [33]	40
3.5. Junta de teflón superior (A) e inferior (B).	41
3.6. Representación de los imanes a utilizar. [22]	41
3.7. Plano y representación 3D del cuerpo de caída [23]	42
3.8. Varilla y casquillo utilizado para la sujeción del Imán	42
3.9. Planos y representación 3D de la base del viscosímetro. [24]	43

3.10. Tubo de Metacrilato. [23]	43
3.11. Diseño de la tapa superior del viscosímetro.	44
3.12. Termostato de circulación Julabo MA-4	45
3.13. Serpentín. [27]	45
3.14. Sensor magnético de proximidad PSC 175/30 [29]	46
3.15. Diseño y planos de la placa de sujeción para los sensores. [24]	47
3.16. Diseño y planos de los soportes para la placa de sujeción. [24]	48
3.17. Placa de conexiones de 830 contactos. [31]	49
3.18. Placa Arduino Leonardo [32]	49
3.19. Montaje del sistema de adquisición de datos.	50
3.20. Sensor de presión WIKA HP2-4000 (A) y el LED WIKA A-1A1-1 (B) [34]	51
3.21. Bomba manual de alta presión nova swiss sin las manivelas montadas.	51
3.22. Depósito de combustible.	52
4.1. Montaje del viscosímetro preparado para ser utilizado.	53
4.2. Diagrama de flujo del funcionamiento de programa de detección.	54
4.3. Diagrama de flujo del funcionamiento del programa de adquisición.	55
4.4. Diagrama de flujo del programa de validación.	56
4.5. Datos de un ensayo realizado con Octano a 45°C.	57
4.6. Representación gráfica del ensayo realizado con Octano a 45°C.	58
4.7. Dos bloques de medidas con Heptano a 35°C.	58
4.8. Representación gráfica de la velocidad en los ensayos con heptano a 35°C.	59
4.9. Comparación de los promedios de las medidas del heptano en distintos días.	59
4.10. Gráficas de viscosidad y densidad en función de la temperatura. [36]	61
4.11. Gráficas para el calculo de las propiedades del Hexadecano.	61
4.12. Recta de calibración del Heptano construida con el primer método.	62
4.13. Recta de calibración del Heptano construida con el segundo método.	63
5.1. Gráfica y ecuación de la recta de calibración.	66
5.2. Comparación entre la viscosidad medida y teórica de los combustibles ensayados.	67
5.3. Error del la viscosidad medida de cada combustible	68
1.1. Coste horario de los implicados en el proyecto.	81
1.2. Coste de la mano de obra del proyecto	81
1.3. Cálculo de la amortización del equipo	82
1.4. Coste del equipo y de las licencias utilizadas en el proyecto	82
1.5. Costes de los componentes y materiales comprados para la realización del proyecto	83
1.6. Coste del material fungible	83
1.7. Coste total del proyecto.	84

Documento I

MEMORIA

Índice de documento

1 Planteamiento

1.1. Introducción	5
1.2. Antecedentes	5
1.3. Justificación y Objetivos	7
1.4. Viabilidad	8
1.5. Estructura del proyecto	8
1.5.1. Memoria	8
1.5.2. Presupuesto	9

2 Fundamento Teórico

2.1. El proceso de inyección en motores diésel	11
2.1.1. Tipos De Inyección Directa	11
2.1.2. El Sistema Common Rail	12
2.2. Reología	14
2.2.1. Definición	14
2.2.2. Objetivos De La Reología	15
2.3. Viscosidad	15
2.3.1. Definición	15
2.3.2. Clasificación	15
2.4. Influencia de la viscosidad en el proceso de inyección	18
2.4.1. Dinámica Del Inyector	18
2.4.2. Atomización Del Combustible	21
2.4.3. Dependencia De La Viscosidad Con La Temperatura	24
2.4.4. Dependencia De La Viscosidad Con La Presión	26
2.5. Técnicas reométricas	27
2.5.1. Viscosímetro Capilar	28
2.5.2. Viscosímetro Rotacional	30
2.5.3. Viscosímetro De Caída De Cuerpo	30
2.5.4. Metodología De La Caída De Cuerpo	33

3 Materiales

3.1. Descripción del sistema	37
3.1.1. Exigencias De La Instalación	37
3.2. Desglose del sistema	37

3.2.1.	Esquema General	38
3.2.2.	Cuerpo Del Viscosímetro	38
3.2.3.	Sistema De Temperatura	41
3.2.4.	Sistema De Adquisición De Datos	46
3.2.5.	Sistema De Presión	50
4	Calibración	
4.1.	Introducción	53
4.2.	Procedimiento	54
4.3.	Postprocesado	55
4.3.1.	Validación	56
4.3.2.	Análisis De La Repetitividad De Las Medidas	56
4.3.3.	Análisis De Las Medidas De Un Ensayo	57
4.3.4.	Análisis De Las Medidas De Ensayos Diferentes	57
4.3.5.	Recopilación De Datos	59
4.3.6.	Constante De Calibración	62
4.3.7.	Cálculo De Viscosidad Y Error	63
5	Resultados	
5.1.	Introducción	65
5.2.	Pasos para la construcción de la recta de calibración	65
5.2.1.	Elección De Los Combustibles	65
5.2.2.	Recta De Calibración	65
5.3.	Resultados	66
5.3.1.	Análisis De Los Resultados	68
5.4.	Conclusiones	68
5.5.	Propuestas para el futuro	69

Bibliografía

Capítulo 1

Planteamiento

1.1. INTRODUCCIÓN

En los motores de combustión interna con encendido por compresión (MEC), la inyección del combustible a alta presión en el final de la carrera del pistón es un concepto muy importante para el control de la combustión, ya que es necesario que el aire tenga una temperatura lo suficientemente alta para que se produzca el autoencendido.

Introducir el combustible en dicho instante supone unos requerimientos a todo el sistema de inyección, ya que es necesaria una buena distribución y atomización del combustible en la cámara de combustión, a su vez una buena mezcla de este con el aire, y todo ello en un espacio muy reducido de tiempo dentro del ciclo. Además no solo existe un condicionante temporal, sino también espacial, debido a que la combustión se dará en las zonas donde las condiciones de mezcla sean más oportunas y el dosado más cercano al estequiométrico. Por ello no existe una zona concreta y definida: en este caso existen muchos frentes de llama que evolucionan según el chorro del combustible y las turbulencias producidas por el movimiento del aire.

Por consiguiente, que el sistema de inyección funcione correctamente es motivo de que se produzca una buena combustión. Se trata de un factor de gran peso en la calidad de la combustión, sin dejar de lado otros factores como, por ejemplo, el rendimiento del motor.

En este proyecto se estudiará la viscosidad del combustible a inyectar, que es solo uno de los mecanismos físico-químicos que intervienen durante este proceso y tiene un impacto significativo en la dinámica del inyector.

1.2. ANTECEDENTES

El desarrollo de este trabajo ha sido durante el curso 2017-2018 como parte de la línea de Inyección del Departamento de Máquinas y Motores Térmicos (DMMT) de la Universidad Politécnica de Valencia.

El DMMT fue constituido en el año 1979, consta de una trayectoria de más de 30 años centrado en la realización de estudios y proyectos con el objetivo de investigar los procesos termofluidodinámicos de los motores de combustión interna alternativos (MCIA). Muchos de estos estudios se han realizado en colaboración con prestigiosas empresas vinculadas de diferentes formas con los MCIA: Renault, Nissan, Grupo PSA (Peugeot-Citröen), Volvo, Ford, BMW, Bosch, Derbi, Iveco, MAN, Repsol, General Motors, Renfe o la EMT de Valencia.



Figura 1.1: Departamento de Máquinas y Motores térmicos de la UPV

La investigación del DMMT se ha estructurado siguiendo dos objetivos: el primero, aumentar el nivel de conocimiento y la eficiencia científica, por otra parte, elevar la capacidad productiva del grupo de investigación del departamento. Actualmente el conjunto de profesores, investigadores, ingenieros, técnicos y operarios que al comienzo se llamó grupo CMT, ha pasado a ser el Instituto de investigación CMT, y está dividido en las siguientes líneas de trabajo e investigación:

- Renovación de la carga.
- Inyección.
- Combustión.
- Técnicas experimentales.

- Ruido.
- Mantenimiento.

En el ámbito de este proyecto, en el año 1993 la línea de Inyección fue creada, debido a la importancia de estudiar y caracterizar los sistemas de inyección en motores Diesel, formando parte conjunta de la línea de Combustión. En el año 1994, se instaló la primera maqueta de inyección en el DMMT, esta maqueta tenía la capacidad de simular condiciones cercanas a las que se dan dentro de un cilindro de un motor Diesel. Esta maqueta experimental dio la capacidad al departamento de ampliar y profundizar los estudios sobre los sistemas de inyección. A raíz de estos inicios, la actividad en la línea de inyección consiste en analizar, identificar y cuantificar todos los fenómenos físicos que están involucrados en los procesos de la inyección, y por otra parte, aplicar el conocimiento adquirido para evaluar las posibilidades de diferentes sistemas, estrategias, configuraciones geométricas para la mejora de las prestaciones de los motores.

1.3. JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS

En lo que respecta a los motores Diesel de inyección directa, las condiciones con las que el chorro es introducido en la cámara de combustión tienen repercusión en la calidad de la atomización, mezcla, combustión y emisión de contaminantes. Con el fin de aumentar la eficiencia y el rendimiento de este proceso, el sistema de inyección debe proveer el combustible en las condiciones más favorables posibles. Para ello es necesaria una comprensión del proceso de inyección y de los fenómenos que están involucrados en este.

La viscosidad es la propiedad principal a estudiar en este proyecto, y tal como se verá en capítulo 2, esta propiedad tiene una gran importancia en la inyección diesel, tanto en el flujo interno como en el desarrollo del chorro, por lo que es necesario comprender cómo afectan la presión y la temperatura a la viscosidad, para así entender el impacto de las condiciones de trabajo en el proceso de inyección.

Siendo consecuente con esta necesidad, el objetivo de este trabajo es caracterizar el comportamiento de diferentes combustibles en diferentes condiciones de inyección, es decir, a lo largo de diferentes rangos de presión y temperatura. Con estas variaciones de las condiciones de inyección se podrá comprender mejor la influencia sobre la viscosidad, debido a que la viscosidad está influenciada por ambos parámetros. Esta influencia es clave en la inyección como se ha demostrado en el análisis de la dependencia del flujo interno con Re y de los regímenes de atomización con Re y We . Por otro lado, gran parte de los viscosímetros de hoy en día solo han tenido éxito con medidas a temperatura y presión atmosférica. En conjunto, la importancia de la cuestión tratada, junto con la

escasez de instalaciones experimentales para abordarla justifican la ejecución de este trabajo.

Este proyecto sucede a los trabajos desarrollados por Mireia Jiménez, Ignacio Cebreiro, Alberto Ponce y Jamer Junior Figueroa. Y los objetivos de este proyecto son, empleando el diseño base desarrollado en los proyectos anteriores, realizar ensayos con diferentes combustibles para construir una curva de calibración para el viscosímetro con un amplio espectro de utilidad y la máxima precisión posible.

1.4. VIABILIDAD

El Departamento de Máquinas y Motores Térmicos tiene la capacidad de poner todos los medios, económicos, tecnológicos y humanos, para el desarrollo del proyecto. Por lo que la ejecución del proyecto está garantizada.

En el marco económico, el departamento está comprometido a proporcionar los medios y útiles necesarios. Esto es un aspecto primordial ya que se requiere el uso de maquetas y materiales que, en algunos casos, pueden tener un coste elevado. Gran parte de estos materiales se adquieren a empresas externas, lo que supone un coste directo e inevitable.

Tecnológicamente, las necesidades del proyecto fueron cubiertas a lo largo de los trabajos anteriores en esta materia. En ellos se ha dispuesto de *software* específico y de diferentes maquetas montadas de forma satisfactoria.

Por último, en lo que respecta a los medios humanos, la Línea de Inyección del Departamento ha trabajado y desarrollado proyectos de investigación con diferentes empresas del sector, por lo que dispone tanto de técnicos como de ingenieros al igual que de investigadores con una dilatada experiencia en la materia.

1.5. ESTRUCTURA DEL PROYECTO

El proyecto está compuesto por dos documentos principales: la memoria, y el presupuesto.

1.5.1. Memoria

La memoria es la parte principal del proyecto, su objetivo es ofrecer una visión cercana de la evolución y desarrollo del proyecto. A su vez trata de mostrar y explicar la metodología empleada, los resultados y las conclusiones obtenidas. La estructura de esta trata de empezar por los aspectos más generales para luego finalizar en lo más específico.

En el primer capítulo, *Planteamiento del proyecto*, se realiza una descripción superficial de trabajo donde se explican los objetivos de este, y adicionalmente presenta al DMMT y las diferentes actividades y estudios que realiza.

En capítulo *Fundamento teórico* se explican y comentan los diferentes conceptos teóricos que deben de ser asimilados para la comprensión y realización de ensayos y cálculos relacionados con la viscosidad de un fluido y las diferentes técnicas de medida.

Como tercer capítulo aparece *Materiales*, en el cual se establecen y explican los diferentes subsistemas que componen el viscosímetro y sus funciones, además de especificar los componentes físicos que lo forman.

En cuarto lugar está el capítulo *Calibración*, en el que se explican detalladamente los procesos de medida y la validación de estas, además de los posteriores cálculos y la forma de obtener los datos necesarios para el postprocesado.

Como quinto y último capítulo, *Resultados*, donde se empieza por la explicación del proceso de elaboración de la recta de calibración final, para proseguir con los resultados y conclusiones de proyecto.

1.5.2. Presupuesto

En el presupuesto se detallan los diferentes costes del proyecto, siendo desglosados en aspectos como material, equipos y mano de obra durante la realización de este Trabajo de Fin de Grado.

Capítulo 2

Fundamento Teórico

2.1. EL PROCESO DE INYECCIÓN EN MOTORES DIÉSEL

La función del sistema de inyección es aportar al combustible unas características físicas concretas, para que se dé una correcta mezcla entre el combustible y el aire, el cual se encuentra en torno a los 800°C debido a la compresión dentro del cilindro, y después se produzca la combustión completa del combustible de forma espontánea.

2.1.1. Tipos De Inyección Directa

Cuando hablamos de la inyección directa, describimos los casos en los que el combustible se inyecta directamente en la cámara de combustión. El otro tipo de inyección es de forma indirecta, que se realiza fuera de la cámara de combustión, generalmente, en el colector de admisión, pero esta forma no supone unas condiciones que presenten dificultad para el proceso.

La formación de la mezcla resulta ser un concepto crítico para obtener una buena combustión y es en el proceso de inyección directa donde, en condiciones de alta presión y temperatura, esta mezcla tiene que ser de gran calidad y suceder en un pequeño espacio de tiempo en el que ocurra la atomización, evaporación y al fin la combustión. Por todo ello, es en este tipo de inyección donde se centra este trabajo.

Respecto a los tipos de inyección directa, se diferencian:

- **Sistemas de acción directa:** En este sistema, la única función de los inyectores es atomizar el combustible, el elemento ocupado de la distribución del combustible es la bomba de alta presión del sistema de inyección. La desventaja que presenta este sistema es que tanto la presión de inyección como el punto de inicio de la inyección dependen del régimen de funcionamiento de la bomba, esto último

hace necesarios elementos o mecanismos con la función de bloquear la bomba en diversos momentos.

- **Sistemas de acumulación:** En este tipo de sistema de inyección la bomba de alta presión únicamente se encarga de alcanzar la presión deseada y de mantenerla estable. Por otra parte, los inyectores, ya sean controlados mecánica o electrónicamente, son los encargados de dosificar la cantidad de combustible a inyectar, así como de atomizar el combustible. Este sistema está más presente en el mercado debido a resultar más versátil.

A continuación, se trata en más profundidad, una variante de los sistemas de acumulación denominada *common rail*, que tiene una gran presencia en el mercado de motores de encendido por compresión.

2.1.2. El Sistema Common Rail

El sistema de acumulación conocido como *common rail* es un sistema de inyección electrónico para motores diésel. Como se muestra en la figura 2.1, la bomba de baja presión lleva el combustible desde el depósito hasta la bomba de alta presión, y a su vez, la bomba de alta presión, mediante la acción del cigüeñal, porta el combustible a los diferentes inyectores a través del raíl.

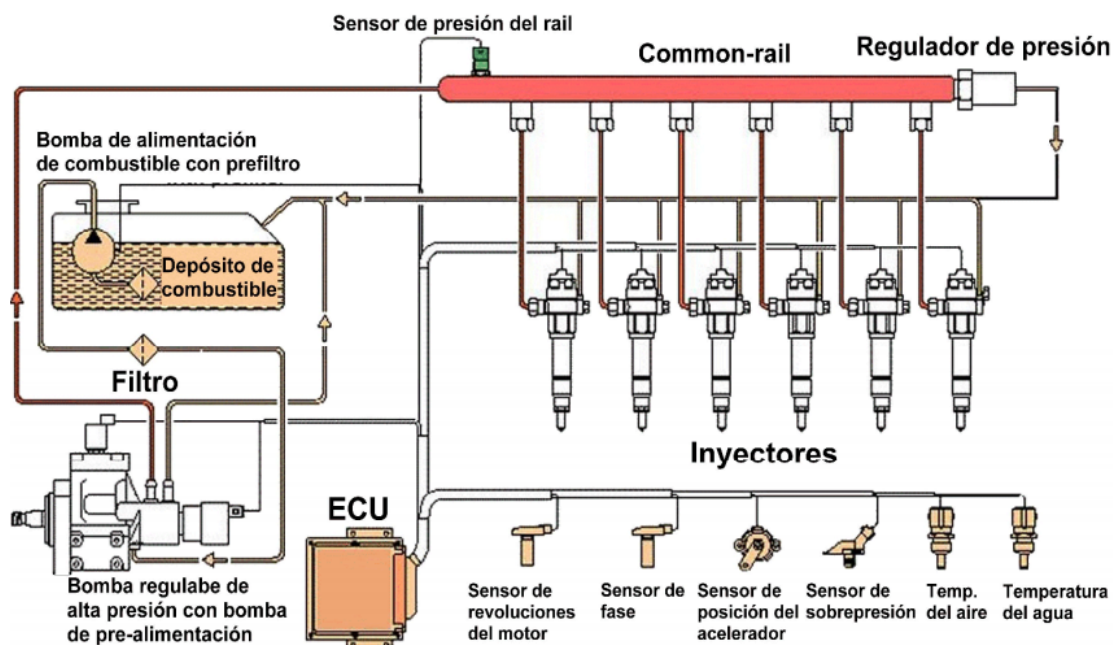


Figura 2.1: Esquema descriptivo del sistema common rail. [1]

Gran parte del combustible que se trasiega por el raíl es inyectado en la cámara de combustión, y el resto forma el caudal de control, el cual regresa al depósito de

combustible, que a su vez ha sido utilizado para el pilotaje hidráulico de los inyectores. A su vez, el raíl hace función de depósito acumulador y de amortiguador de las oscilaciones de presión generadas tanto por la bomba de alta presión como por la salida del combustible en los inyectores.

Es la ECU la que abre y cierra los inyectores en instantes concretos, y la cantidad de combustible que se inyecta en la cámara de combustión depende de diversos parámetros como la duración de la apertura, la presión en el raíl y la permeabilidad y capacidad de descarga de los orificios de salida de cada inyector.

En cuanto a los inyectores, se pueden clasificar en dos tipos, según su funcionamiento interno. Los que funcionan con una válvula solenoide o los que utilizan una válvula de tipo piezoeléctrico, ambos con un funcionamiento parecido, se pilotan hidráulicamente gracias a una válvula. En el caso de los piezoeléctricos permiten una respuesta más rápida y una mayor flexibilidad en cuanto a la mejora de la combustión para la reducción de emisiones contaminantes ya que es posible realizar inyecciones múltiples.

Los inyectores piezoeléctricos basan su funcionamiento en la aplicación de tensión eléctrica a un conjunto de placas cristalinas, en su mayoría de cuarzo, lo que provoca una dilatación de estas y desencadena el proceso hidráulico entre el cristal y la aguja, como se ve en la figura 2.2. Este proceso consigue mantener el inyector abierto hasta realizar la inyección, que acaba cuando se descarga la tensión que se ha acumulado en el actuador. Con este tipo de inyectores se pueden conseguir presiones de hasta 3000 bar.

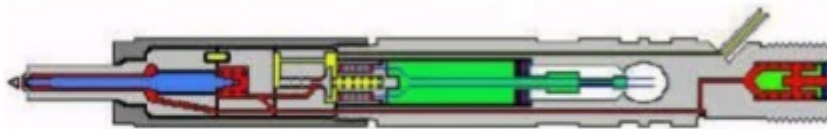


Figura 2.2: Esquema de un inyector piezoeléctrico. [2]

El resto de casos donde se instala un sistema *common rail*, se utilizan inyectores del tipo solenoide. Este tipo de inyectores funcionan como se observa en la figura 2.3, en el momento que el solenoide está activado, la fuerza electromagnética vence a la fuerza elástica del muelle y hace que la bola se levante y deje fluir el volumen de control de vuelta al depósito. Como consecuencia la aguja se levanta y deja paso a la propia inyección.

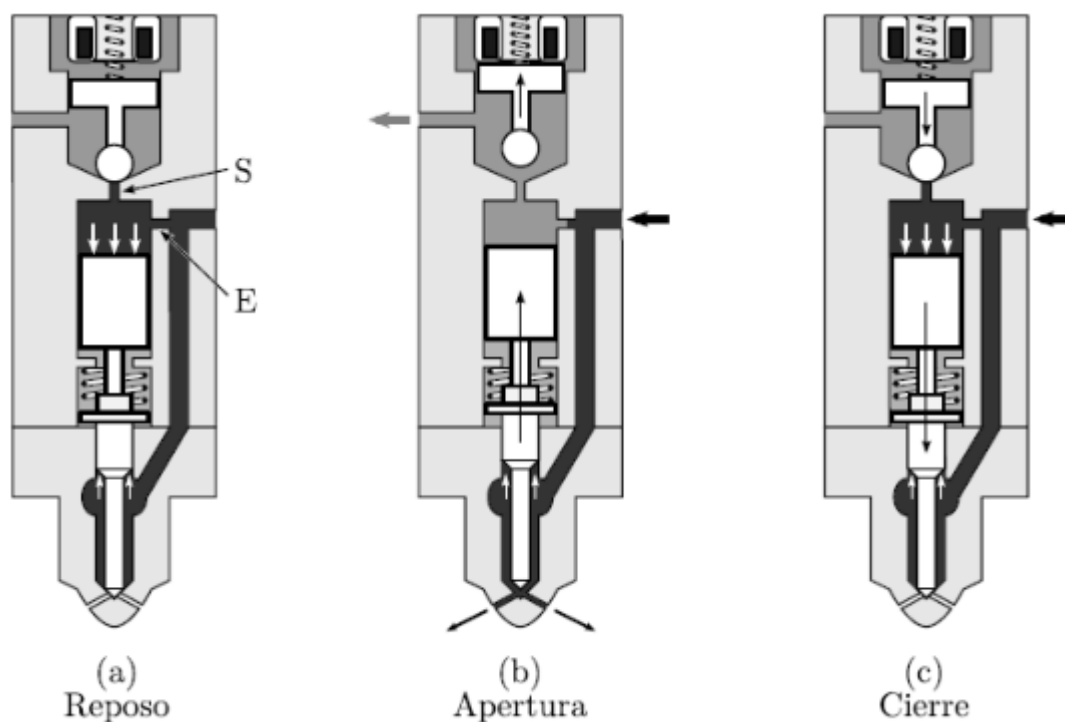


Figura 2.3: Funcionamiento de un inyector de tipo solenoide. [3]

2.2. REOLOGÍA

2.2.1. Definición

Se llama Reología a la disciplina científica que estudia la deformación y el fluir de la materia. Es decir, relaciona el esfuerzo aplicado a un material que puede fluir y la deformación obtenida.

Con el objetivo de medir las propiedades mecánicas que estudia esta ciencia, se utilizan reómetros, unos aparatos que someten al material a una variedad de esfuerzos y obtener la deformación que estos le inducen, o viceversa. Es posible estudiar cualquier material, ya sea sólido, líquido o gas. Porque un sólido ideal se deforma elásticamente y la energía requerida se recupera totalmente al retirar el esfuerzo, en cambio, los fluidos ideales se deforman irreversiblemente, fluyen y la energía requerida para esta deformación acaba disipándose aumentando la temperatura del fluido, por lo que no se recupera la energía al retirar el esfuerzo. Sin embargo, se encuentran unos líquidos con un comportamiento reológico a medio camino entre los sólidos ideales y los líquidos ideales: se trata de un comportamiento elástico y viscoso, conocidos como viscoelásticos. Por otra parte, los sólidos que se encuentran en la realidad, con fuerzas de magnitud suficiente, se deforman de forma irreversible, ergo pueden fluir.

En cuanto a la clasificación de los diferentes comportamientos reológicos en relación con su respuesta a esfuerzos aplicados, es necesario introducir un parámetro que

relaciona el tiempo de relajación de un material (λ) con el tiempo del proceso de deformación aplicado (t), se trata de un número adimensional que muestra la escala de tiempo en la que se aplica la deformación. Se denomina número de Deborah:

$$De = \frac{\lambda}{t} \quad (2.1)$$

Si este valor es muy alto, el material es considerado sólido elástico, pero si se obtiene un valor pequeño se toma por un líquido viscoso.

2.2.2. Objetivos De La Reología

Existen dos objetivos principales:

- Por un lado, conseguir elaborar y desarrollar ecuaciones para relacionar el esfuerzo con la deformación del material estudiado. Se conocen por el nombre de ecuaciones constitutivas que por lo general tienen un carácter tensorial.
- Por otra parte, desarrollar las relaciones que reflejan la influencia en la estructura y composición del material, de la presión y de la temperatura en el comportamiento reológico del material.

2.3. VISCOSIDAD

2.3.1. Definición

La viscosidad es una propiedad de los fluidos que presenta su resistencia a deformarse cuando a este se le aplica un esfuerzo de corte sobre el fluido. Esta propiedad diferencia el comportamiento de fluidos y sólidos.

Para comprender el concepto de viscosidad, es necesario comprender que, a nivel microscópico, la viscosidad se basa en la cohesión molecular entre las diferentes capas de fluido en movimiento. Es produce que, al desplazarse unas capas sobre otras, algunas partículas se vean arrastradas por otras partículas vecinas. Por lo que los efectos de la viscosidad solamente tienen sentido cuando el fluido no se encuentra en reposo.

2.3.2. Clasificación

Según la viscosidad, los fluidos se pueden clasificar en:

- **Fluidos perfectos:** Se trata de un estado de la materia que se caracteriza por la ausencia absoluta de viscosidad, esto significa que los fluidos no presentan resistencia a deformarse. De tal forma que en un circuito cerrado fluirían sin fricción de forma infinita.

- **Fluidos newtonianos:** Su viscosidad se considera constante en el tiempo, y mantiene una relación lineal entre el esfuerzo y la velocidad de deformación.
- **Fluidos no newtonianos:** La viscosidad de este tipo de fluidos varía según la temperatura y la tensión cortante que se le aplica. Por lo que estos fluidos tienen un valor de viscosidad que no es constante, es decir, que la relación entre la viscosidad y el esfuerzo constante no es lineal.

Estos últimos se pueden clasificar a su vez en tres grupos:

- **Fluidos no newtonianos independientes del tiempo:** en los cuales la velocidad de deformación no se ve influenciada por el tiempo de aplicación de esfuerzo. Y entre ellos destacan:
 - **Fluidos pseudoplásticos:** su viscosidad disminuye a medida que aumenta el esfuerzo aplicado.
 - **Fluidos dilatantes:** son aquellos en los que su viscosidad aumenta a medida que lo hace el esfuerzo aplicado.
 - **Plásticos de Bingham:** se comportan como un sólido a bajos esfuerzos, y como fluidos newtonianos una vez se ha superado el esfuerzo inicial.
- **Fluidos no newtonianos dependientes del tiempo:** en este caso la velocidad de deformación sí se ve influenciada por el tiempo de aplicación del esfuerzo, y destacan:
 - **Fluidos reopécticos:** su viscosidad aumenta a medida que aumenta el tiempo de exposición al esfuerzo cortante.
 - **Fluidos tictrópicos:** su viscosidad disminuye a medida que aumenta el tiempo de exposición al esfuerzo cortante.
- **Fluidos viscoelásticos:** Presentan propiedades elásticas y viscosas. [4]

En la figura 2.4 observamos la curva de flujo de los distintos tipos de fluidos:

Además, existen diferentes definiciones para diferentes tipos de viscosidad:

- **Viscosidad dinámica (μ):** se trata de la relación entre el esfuerzo cortante y el gradiente de velocidad en la dirección perpendicular al movimiento del fluido. Sus unidades son:

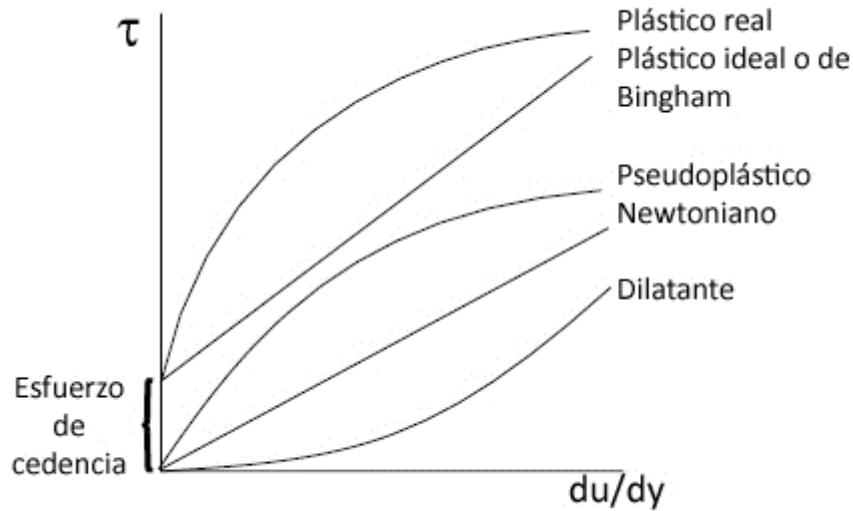


Figura 2.4: Curva de flujo de los distintos tipos de fluidos [5]

$$\mu = \frac{\tau}{\frac{du}{dy}} = \frac{\frac{N}{m^2}}{\frac{1}{s}} = \frac{Ns}{m^2} = \frac{kg \frac{m}{s^2} s}{m^2} = \frac{kg}{ms} = Pa \cdot s = cP \quad (2.2)$$

- **Viscosidad cinemática** (ν): es la relación que existe entre la viscosidad dinámica y la densidad del fluido estudiado.

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (2.3)$$

Y sus unidades son:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} = \frac{\frac{kg}{ms}}{\frac{kg}{m^3}} = \frac{m^2}{s} = 10^4 St = 10^6 cSt \quad (2.4)$$

- **Viscosidad aparente** (η): tiene como objetivo caracterizar la viscosidad en fluidos no newtonianos. Se define como el cociente entre el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación de la curva de flujo, es la pendiente en cada punto de dicha curva. Esto se puede observar fácilmente en la figura (2.2).
- **Viscosidad extensional** (μ_e): es aquella viscosidad de un fluido no newtoniano cuando a este se le aplica un esfuerzo extensivo. Por lo tanto, la relación entre el esfuerzo y la velocidad de deformación en la dirección que se produzca. El conocido como número de Trouton, es la relación entre esta viscosidad y la dinámica, que para los fluidos newtonianos tiene un valor de 3.

2.4. INFLUENCIA DE LA VISCOSIDAD EN EL PROCESO DE INYECCIÓN

Una vez habiendo desglosado el funcionamiento de los diferentes tipos de inyector y los tipos de viscosidad, se establece el momento donde la viscosidad juega un papel fundamental en el momento cuando se produce el proceso hidráulico en el inyector. A razón de que esta propiedad influye en las pérdidas de carga cuando el combustible circula entre los orificios de entrada y salida del volumen de control, esto tiene un impacto tanto en la dinámica del inyector como en la atomización del combustible.

2.4.1. Dinámica Del Inyector

La viscosidad se define como la oposición del combustible a fluir, esto implica que debe ser un valor relativamente bajo para habilitar su circulación sin excesivas pérdidas de carga y a su vez necesita un valor mínimo para no descuidar su labor como lubricante.

En el ámbito de los motores Diesel, la velocidad de apertura y cierre del inyector depende del comportamiento del combustible en el interior de este, por lo tanto de su viscosidad. Siendo las pérdidas de carga directamente proporcionales a la viscosidad del combustible. La mayor parte de estas pérdidas suceden al atravesar el orificio del inyector, quedando en segundo plano las producidas por la fricción con las paredes.

Pérdidas De Carga En El Orificio. Las pérdidas que se producen cuando el fluido es trasegado por el orificio dependen tanto del coeficiente de pérdidas ξ , que representa la influencia de la geometría del orificio, como del número de Reynolds, como puede observarse en la figura 2.5:

$$Re = \frac{\rho v_s D}{\mu} \quad (2.5)$$

donde:

- v_s es la velocidad característica del fluido.
- ρ es la densidad del fluido.
- D es el diámetro de la tubería por la cual es trasegada el fluido, o la longitud característica del sistema.
- μ es la viscosidad dinámica del fluido.

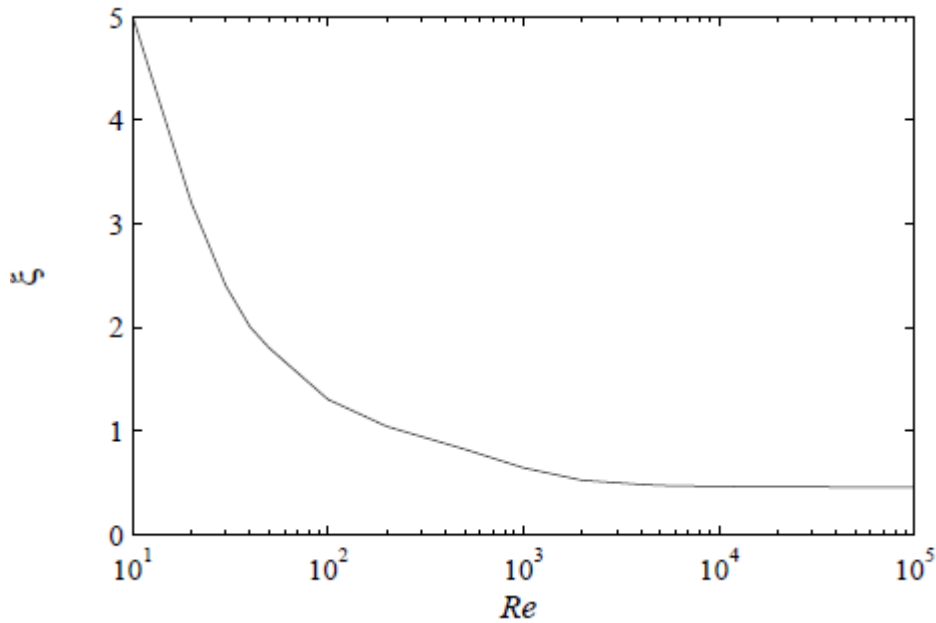


Figura 2.5: Pérdidas de carga en función del número de Reynolds [6]

Pérdidas Por Fricción Con Las Paredes. Se pueden calcular las pérdidas causadas por la fricción del fluido con las paredes a partir de la ecuación 2.6:

$$\Delta p_{fric} = f \frac{L}{D} \frac{\rho_f}{2} u_m^2 \quad (2.6)$$

Se observa que estas pérdidas son directamente proporcionales tanto a la geometría del orificio L/D , como al factor de fricción f , el cual varía en función de la rugosidad de las paredes y del número de Reynolds, por lo que es dependiente de la viscosidad del combustible.

Coefficiente De Descarga. Se trata de un parámetro que representa el caudal másico que se inyecta, en función del caudal másico teórico que se podría inyectar. Este parámetro depende de las pérdidas por fricción con las paredes, y en consecuencia, de la viscosidad del combustible. Este coeficiente se expresa:

$$C_d = \frac{\dot{m}}{\dot{m}_{teo}} = \frac{\dot{m}}{A_0 \sqrt{2\rho_f \Delta p}} \quad (2.7)$$

En la figura 2.6, se observa la evolución del coeficiente de descarga en función número de Reynolds, la cual es, lógicamente, inversamente proporcional a las pérdidas de carga.

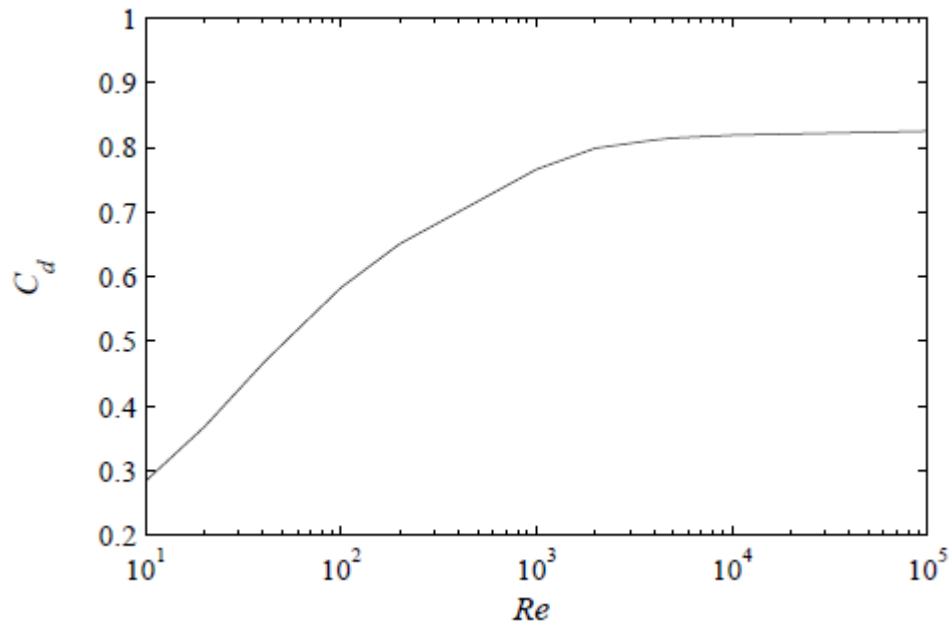


Figura 2.6: Evolución del coeficiente de descarga en función del número de Reynolds para un orificio de aristas rectas. [?]

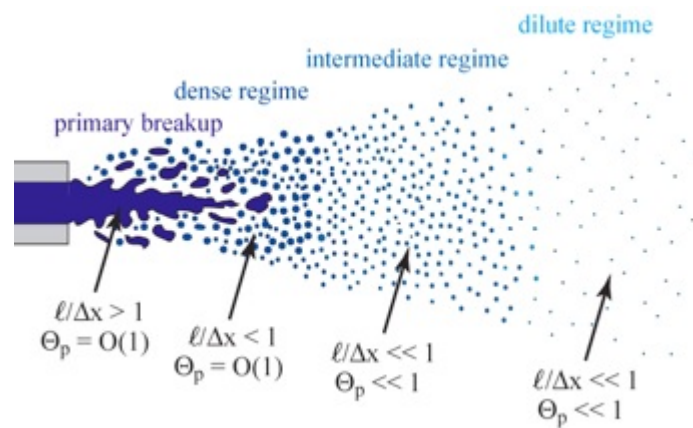


Figura 2.7: Evolución de las características del flujo al ser inyectado. [8]

2.4.2. Atomización Del Combustible

Es necesario que el combustible se mezcle rápidamente con el aire que está en la cámara de combustión, para que se pueda producir un proceso de combustión. Para ello deben transcurrir los estados representados en la figura 2.7, en la que el primer paso es la atomización del combustible al abandonar la tobera y ser introducido en el habitáculo donde reside el gas ambiente. Una vez superada la distancia de rotura, el flujo líquido se convierte en una acumulación de gotas, lo que se llama atomización primaria. Una vez llegado a este punto se pueden dar dos situaciones, la coalescencia, en la cual las gotas chocan entre ellas y aumentan su tamaño, y la atomización secundaria, donde las gotas siguen separándose y reduciendo su tamaño. Esta última es la opción positiva, ya que para el proceso de mezcla con el gas es importante maximizar la superficie de contacto, y con ello la evaporación del combustible.

Análisis Dimensional Del Proceso De Atomización Primaria.

En el proceso de atomización intervienen los siguientes parámetros:

- Densidad del aire ρ_a en kg/m^3 .
- Densidad del combustible ρ_f en kg/m^3 .
- Velocidad relativa entre el combustible y el aire o velocidad de inyección u_{ef} en m/s .
- Diámetro efectivo del orificio D_{ef} en m^2 .
- Viscosidad del combustible μ en kg/ms .
- Tensión superficial del combustible σ en kg/s^2 .

Estos hacen un total de seis parámetros dependientes de tres magnitudes fundamentales, que son longitud, peso y tiempo, y según el teorema Pi de Buckingham la influencia de estos sobre la atomización se puede simplificar gracias a tres números adimensionales, sean el número de Reynolds, el coeficiente de densidades y uno de los siguientes:

$$We = \frac{\rho_f u_{ef}^2 \phi_{ef}}{\sigma_f} \quad (2.8)$$

$$Oh = \frac{\sqrt{We}}{Re} = \frac{\mu}{\sqrt{\rho_f \phi_{ef} \sigma_f}} \quad (2.9)$$

$$Ta = \frac{Re}{We} = \frac{\sigma_f}{\mu u_{ef}} \quad (2.10)$$

Que son, respectivamente, los números de Weber, Ohnesorge y Taylor.

Se utiliza la figura 2.8, con el fin de mostrar gráficamente la influencia de estos números adimensionales en diferentes regímenes de atomización. Y se observa que la atomización es más intensa con altos rangos de los números de Reynolds y de Ohnesorge, también con el aumento del coeficiente de densidades. Por contra el impacto de este último es importante para cocientes de densidades bajos mientras deja de tener impacto a partir de un valor crítico. Este comportamiento se observa en la figura 2.9 gracias al paralelismo de dichas fronteras al eje de este parámetro.

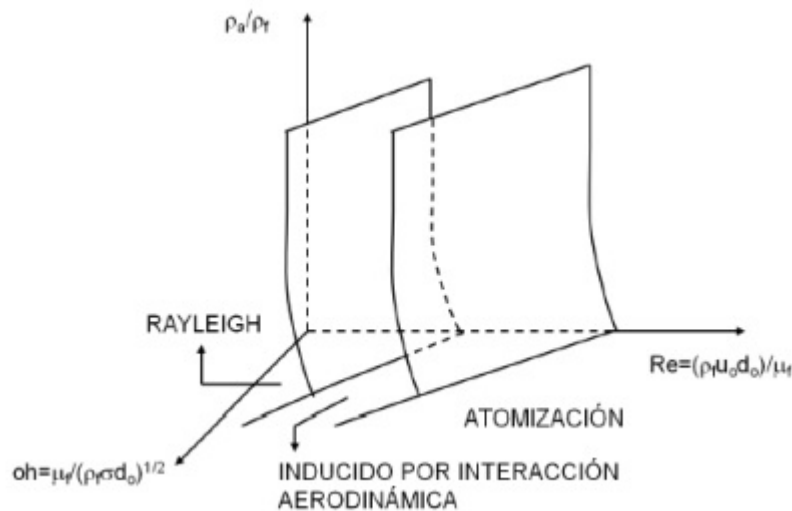


Figura 2.8: Diferentes regímenes de atomización en función de tres números adimensionales [9]

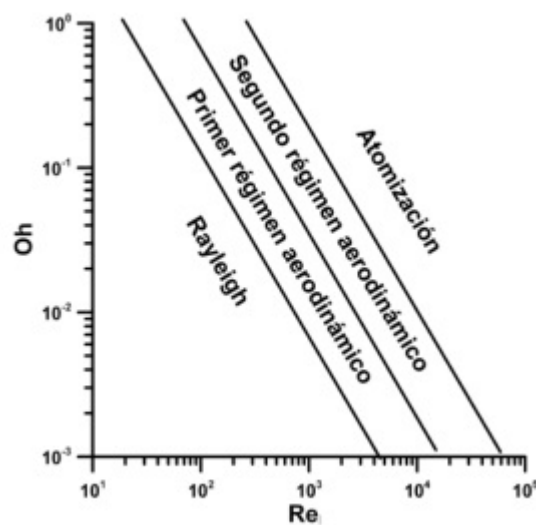


Figura 2.9: Representación de los regímenes de atomización. [9]

Y por ello queda patente que estos tres números adimensionales, de los cuales dos de ellos (Ohnesorge y Taylor) dependen directamente de la viscosidad y por tanto

confirman que esta propiedad tiene relevancia en la atomización del combustible, serán los que situarán al flujo en uno de los posibles regímenes de atomización.

Regímenes De Atomización. En la figura se diferencian los diferentes regímenes de atomización dependiendo del número de Reynolds, que, según Lefebvre, [7], son los siguientes:

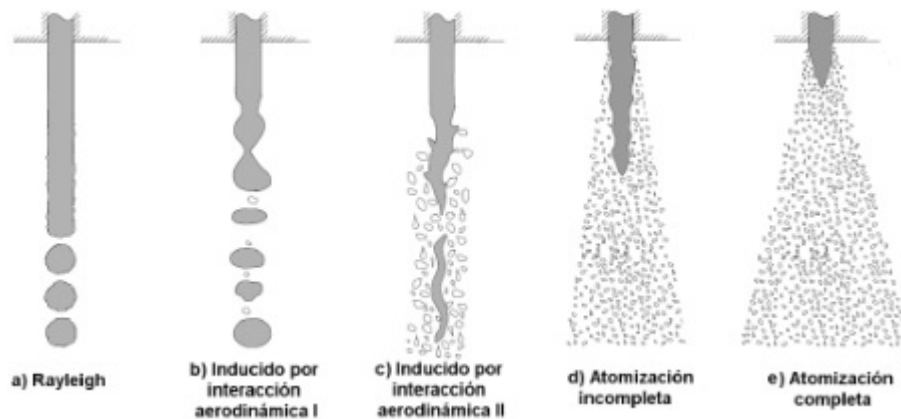


Figura 2.10: Regímenes de atomización [3]

- El Régimen de Rayleigh es propio de velocidades muy bajas en la inyección, en torno a los 10 m/s. En estas condiciones la atomización del combustible es debida a la tensión superficial del agua. Este flujo se divide en gotas de un diámetro considerable y uniforme debido a los esfuerzos radiales que producen las perturbaciones iniciales.
- El primer régimen inducido por interacción aerodinámica se da de dos formas diferentes:
 - En condiciones de velocidades bajas, se dan inestabilidades axisimétricas gracias a las fuerzas de tensión superficial. Esto produce que el chorro sufra una atomización más rápida y se produzcan gotas de un diámetro similar al de la vena líquida.
 - En cuanto a situaciones con velocidades más altas, la tensión superficial pierde protagonismo en pro de las fuerzas aerodinámicas. Dado que a partir de cierta velocidad el chorro oscila en torno a su eje, y el fluido adquiere una forma helicoidal, que disminuye la sección y provoca una atomización similar al caso anterior.
- El segundo régimen inducido por interacción aerodinámica se produce cuando la velocidad de inyección aumenta. La combinación entre la turbulencia a la salida

del inyector y la interacción aerodinámica producen que la vena líquida se separe en pequeñas gotas, y en este caso, la distancia entre el orificio y el inicio de la separación de las gotas depende de la velocidad de inyección. Y el diámetro de las gotas está directamente relacionado con la longitud de onda de las perturbaciones.

- En el régimen de atomización, conforme aumenta la velocidad de inyección, la separación de las gotas ocurre cada vez más cerca del orificio de salida. Una vez superada una velocidad concreta, sucede la atomización en la misma salida del orificio, y esa situación se conoce como atomización completa.

2.4.3. Dependencia De La Viscosidad Con La Temperatura

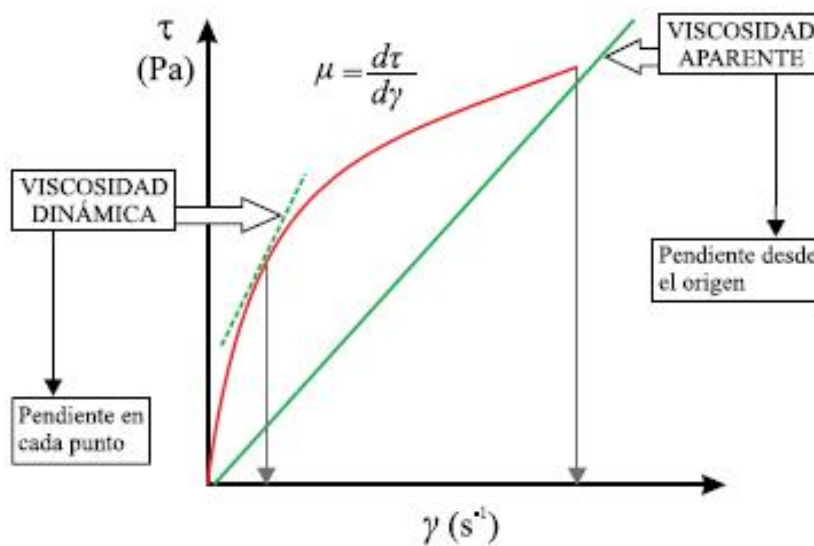


Figura 2.11: Curva de fluidez para representar la viscosidad dinámica y aparente [10]

La fluidez del líquido tiende a aumentar conforme la temperatura asciende, es decir, un incremento de la temperatura es correspondido con una disminución de la viscosidad. Para llegar a comprender este proceso hay que analizarlo a nivel molecular.

Un aumento de la temperatura reduce el tiempo de interacción entre las moléculas ya que estas adquieren velocidad y movilidad, y la energía cinética supera a las fuerzas de cohesión.

Para conseguir una descripción precisa de este fenómeno a nivel matemático, en la literatura se han llevado a cabo ajustes para modelos empíricos relativamente simples:

- **Ecuación de Poiseuille:**

$$\mu = \frac{\mu_0}{1 + \alpha T + \beta T^2} \quad (2.11)$$

donde μ_0 es la viscosidad dinámica a una temperatura de 0°C , T la temperatura ($^\circ\text{C}$) y α y β son coeficientes constantes.

■ **Ecuación de Arrhenius:**

$$\mu = A \cdot e^{\frac{B}{T}} \quad (2.12)$$

para el caso donde μ es la viscosidad dinámica ($\text{Pa}\cdot\text{s}$), T la temperatura absoluta (K) y A y B constantes que dependen del líquido. Para resolver este modelo, como se observa en la ecuación 2.13 se ajustan las constantes A y B graficando el $\log \mu$ en función de $1/T$:

$$\log(\mu) = \log(A) + \frac{B}{T} \log(e) = \log(A) + \frac{0.434B}{T} \quad (2.13)$$

donde $\log(A)$ es la ordenada en el origen y $0.434B$ es la pendiente de la gráfica obtenida.

■ **Modelo exponencial:**

El rango de temperaturas para el cual es válido este modelo está limitado, y toma esta expresión:

$$\mu = \mu_0 \cdot e^{-bT} \quad (2.14)$$

Donde T hace referencia a la temperatura, μ_0 representa las condiciones de referencia y b es una constante que se ajusta experimentalmente.

En lo que respecta a los gases, la agitación y el choque de las moléculas es mayor cuanto mayor es la temperatura, por lo que tienen mayor fricción, ergo mayor resistencia al movimiento. Esto se traduce en un aumento de la viscosidad, y junto con los análisis basados en la teoría cinética se predice que:

$$\mu \propto \sqrt{T} \quad (2.15)$$

La predicción de la teoría cinética es coherente con las tendencias experimentales, pero se debe determinar la constante de proporcionalidad y diversos factores de corrección. Para ello, con dos o más puntos experimentales se utiliza la correlación empírica de Sutherland. [11]

$$\mu = \frac{bT^{1/2}}{1 + S/T} \quad (2.16)$$

En la figura 2.12 se observan las tendencias de la viscosidad dinámica con la temperatura tanto para fluidos líquidos como para gaseosos.

Con el fin de valorar los cambios en la viscosidad en función de la temperatura se define el *índice de viscosidad* (I.V):

- Se obtienen valores altos cuando el fluido estudiado muestra un cambio pequeño en su viscosidad.
- Se obtienen valores pequeños en los casos en los que el fluido estudiado muestra un gran cambio en su viscosidad.

Dentro del contexto de este trabajo, es importante el análisis de la dependencia de la viscosidad respecto a la temperatura. Sobretudo a bajas temperaturas, debido a la importancia del arranque en frío, una situación donde se pueden dar temperaturas muy bajas en el motor. El problema se basa en el aumento de la viscosidad del combustible a bajas temperaturas, lo que dificulta la inyección. Tal como se aprecia en la figura 2.13, la cual muestra el desplazamiento de la aguja del inyector respecto del tiempo, se ve como a medida que disminuye la temperatura, este movimiento del inyector se ve modificado. En los casos en los que las temperaturas no son muy bajas, la pendiente de ascenso y descenso de la gráfica, es decir, el tiempo que tarda en abrir y cerrar el inyector no varía en exceso. Pero en aquellos en los que las temperaturas se acercan a los 273 K, se aprecia como esta primera pendiente, la de apertura, es mucho menor, lo que significa que el levantamiento de la aguja es menor que cuando se tienen temperaturas más elevadas. Por otra parte, la pendiente de cierre es similar a los casos anteriores, es decir, que el cierre del inyector tiene lugar mucho antes. En resumen, el tiempo de inyección es menor y consecuentemente, la masa de combustible inyectada es menor, hecho que implica un funcionamiento del motor diferente al deseado para estas condiciones. Un funcionamiento que se ve afectado por el exceso de viscosidad del combustible.

2.4.4. Dependencia De La Viscosidad Con La Presión

La influencia de la presión sobre la viscosidad, a presiones bajas y moderadas, resulta de un orden de magnitud menor a la temperatura, pero hay que considerar esta influencia para presiones elevadas.

Los fluidos líquidos experimentan un aumento considerable de la viscosidad cuando se someten a valores altos de presión, una evolución que se puede asemejar a un aumento exponencial, el cual se acrecienta a temperaturas más bajas. En cuanto a la aproximación matemática, es complicada utilizando modelos matemáticos simples debido a la gran dispersión de los diferentes líquidos. Este problema se debe a que la evolución de la viscosidad al variar la presión es dependiente de la composición de cada sustancia.

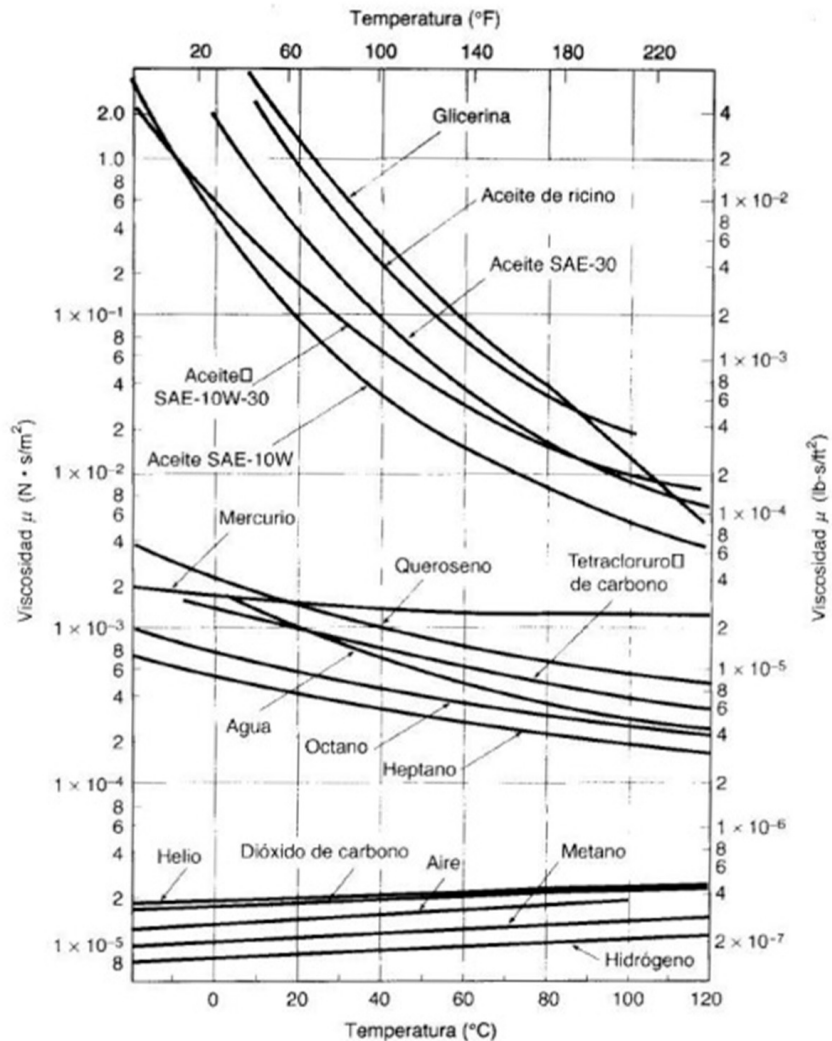


Figura 2.12: Viscosidad dinámica de fluidos comunes en función de la temperatura. [11]

2.5. TÉCNICAS REOMÉTRICAS

La viscosidad no se trata de una propiedad que se pueda determinar o medir de forma directa, por contra se obtiene a partir de calculos, basados en las definiciones de viscosidad dinámica y cinemática, en función de otras magnitudes obtenidas por los métodos correspondientes.

A lo largo del tiempo han llegado a existir principalmente tres tipos de viscosímetros, se tratan de instrumentos capaces de determinar esta propiedad de forma experimental, siendo capaz de aplicarse tanto a gases como a líquidos.

- **Viscosímetro capilar:** Su medida de la viscosidad se basa en el flujo a través de un tubo bajo una diferencia de presión.

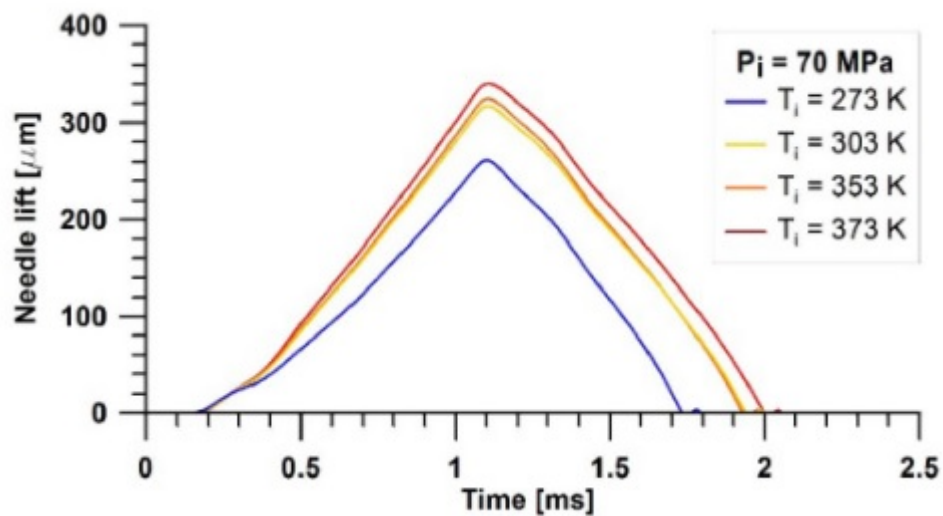


Figura 2.13: Movimiento de la aguja del inyector en función del tiempo. [12]

- **Viscosímetro rotacional:** Obtiene la medida de viscosidad a partir del par ejercido sobre un cilindro rotatorio o disco.
- **Viscosímetro de caída de cuerpo:** Obtiene la medida tras la caída libre de un objeto a través de una columna de fluido.

2.5.1. Viscosímetro Capilar

El viscosímetro capilar es un instrumento diseñado para determinar la viscosidad de un fluido. Se trata del tipo de viscosímetro más antiguo y también el más empleado. Se muestra una configuración típica del viscosímetro capilar en la figura 2.14. En ella se observan dos recipientes conectados por un tubo de pequeño diámetro, conocido como tubo capilar.

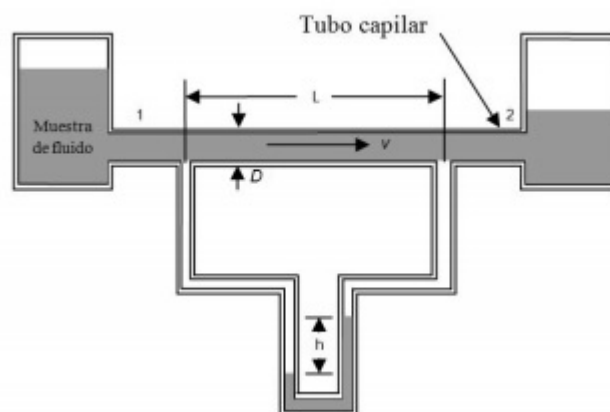


Figura 2.14: Viscosímetro capilar. [13]

En el momento que el fluido es trasegado por el tubo capilar se observa un perfil de velocidades parabólico. Tal como se observa en la figura 2.15, esta distribución establece que la parte del fluido que está en contacto con las paredes del tubo tienen velocidad nula, y la parte del fluido que se sitúa en el centro del tubo, velocidad máxima.

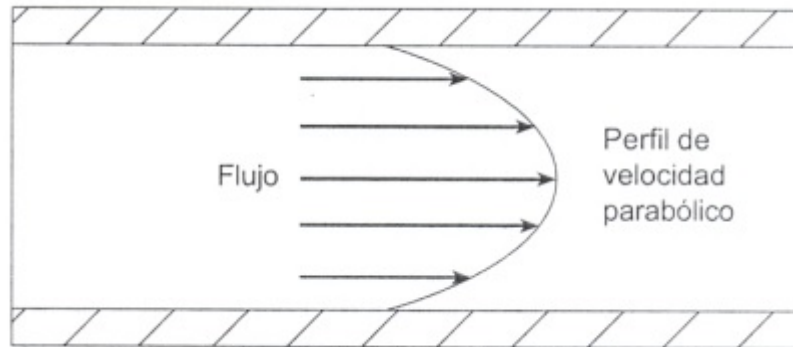


Figura 2.15: Perfil de velocidades del flujo en el interior del tubo. [14]

Cuando el fluido fluye, pierde algo de energía y se genera una caída de presión, la cual puede ser medida mediante un manómetro. Este Δp se relaciona con la viscosidad del fluido a través de la Ecuación 2.17:

$$\Delta p = \frac{32 \cdot \mu \cdot v \cdot L}{D^2} \quad (2.17)$$

Donde:

- Δp es la pérdida de presión a lo largo del viscosímetro. [kg/m^2]
- μ es la viscosidad dinámica. [$Pa \cdot s$]
- L es la longitud del tubo capilar. [m]
- v es la velocidad del fluido. [m/s]
- D es el diámetro interior del tubo. [m]

Este tipo de viscosímetro tienen una gran utilidad para la medida de gran número y variedad de fluidos. Para todos ellos, las normas ASTM D3835 y D5099 describen y explican los procedimientos experimentales para el uso de estos reómetros capilares como:

- **Viscosímetros capilares de vidrio:** Son muy utilizados para medir la viscosidad de fluidos newtonianos a partir de la presión hidrostática del líquido.

- **Viscosímetros de orificio o de copa:** Son normalmente utilizados para examinar las propiedades de flujo en la fabricación y aplicación de tintas y pinturas. Son sencillos y fáciles de manejar pese a no ser muy precisos.
- **Viscosímetro de pistón o extrusión:** Su principal campo de aplicación es la medida de la viscosidad de polímeros fundidos y otros materiales de viscosidad alta. En este caso el fluido se extruye mediante un esfuerzo constante ejercido por un pistón.

2.5.2. Viscosímetro Rotacional

Este tipo de viscosímetro está formado por dos partes, las cuales están separadas por el fluido. Estas pueden ser dos cilindros, superficies paralelas, un cono con cierto ángulo, etc. El funcionamiento se basa en el movimiento de una de las dos superficies, lo que genera un gradiente de velocidades a lo largo del fluido. Para obtener el valor de la viscosidad se debe medir el esfuerzo necesario para producir una determinada velocidad angular. Estos viscosímetros son mucho más versátiles que los estudiados anteriormente y se pueden utilizar para fluidos newtonianos y no-newtonianos, siendo considerablemente más caros que los anteriores. [19]

Los viscosímetros rotacionales más empleados son:

- **Viscosímetros de cilindros concéntricos:** Fueron los primeros viscosímetros rotacionales, y constan de dos cilindros concéntricos entre los cuales se sitúa el fluido. (Figura 2.16 a)
- **Viscosímetros de placas paralelas:** Para este tipo, se sitúan dos placas paralelas, una de ellas inmóvil, mientras la otra es giratoria. El fluido se sitúa entre ellas, y para realizar las medidas es importante mantener un espesor constante del fluido. (Figura 2.16 b)
- **Viscosímetro de cono-placa:** El mismo principio que se aplica a los tipos anteriores, aquí se aplica al espacio comprendido entre un cono y una placa, donde es el cono la parte giratoria, que forman un ángulo α . (Figura 2.16 c)

2.5.3. Viscosímetro De Caída De Cuerpo

Este tipo de viscosímetro se basa en el principio de dejar caer un cuerpo a lo largo de un volumen habitado por el fluido cuya viscosidad se desea medir. Es una disposición que se adapta sin problema a la necesidad de caracterizar la viscosidad de diferentes combustibles en condiciones de alta presión y viscosidad.

Dentro de este tipo destacan dos ejemplos de viscosímetro:

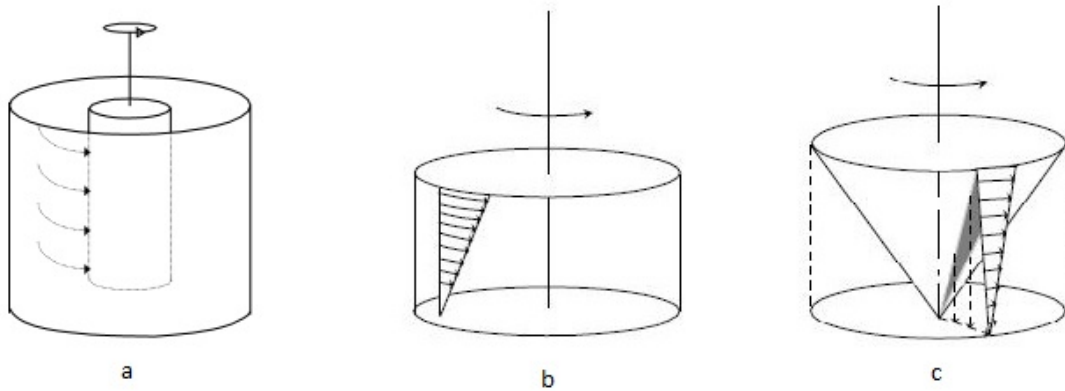


Figura 2.16: Tipos de viscosímetro rotacional. [5]

Viscosímetro De Caída De Esfera. También conocido como viscosímetro Höppler, se forma por un tubo de vidrio dentro del que está el fluido, este tubo está situado dentro de otro tubo de mayor diámetro, el cual está lleno de agua utilizada como medio termoestático. Tal como se observa en la figura 2.17 el conjunto puede rotar los tubos en el eje perpendicular a ellos.



Figura 2.17: Viscosímetro Höppler. [15]

El procedimiento de medida es el siguiente. En primer lugar se llena el tubo interior del fluido que se quiere medir. Y después se deja caer una esfera, ya sea de acero o vidrio, obteniendo la velocidad límite que alcanza la esfera midiendo el tiempo que tarda en recorrer la distancia marcada en el tubo. Conocida esta velocidad, se relaciona con la viscosidad del fluido mediante la ecuación 2.18, conocida como ecuación de Stokes. Para el uso apropiado de este viscosímetro es conveniente validar el ensayo mediante el cálculo del número de Reynolds, que debe ser menor a 0.1, para confirmar que las fuerzas viscosas predominan sobre las fuerzas de inercia.

$$\mu = \frac{2r^2(\rho_s - \rho_l)g}{9U_{max}} \quad (2.18)$$

$$Re = \frac{\rho_l \cdot U_{max} \cdot d}{\mu} \quad (2.19)$$

donde:

- r es el radio de la esfera [m]
- ρ_s rrepresenta la viscosidad de la esfera [kg/m^3]
- ρ_l rrepresenta la viscosidad del fluido [kg/m^3]
- U_{max} es la velocidad máxima alcanzada por la esfera [m/s]
- d es el diámetro de la esfera [m]
- μ es la viscosidad del fluido [$N \cdot s/m$]

Con el fin de corregir el error causado por la pared del tubo, que crea perturbaciones, se modifica la ecuación de Stokes de la siguiente manera:

$$F = 1 - 2,104\frac{d}{D} + 2,09\left(\frac{d}{D}\right)^3 - 0,905\left(\frac{d}{D}\right)^5 \quad (2.20)$$

$$\mu_F = F\mu(s) \quad (2.21)$$

en esta ecuación, μ_F es la viscosidad corregida según Faxén en $N \cdot s/m$; y μ_s es la viscosidad según Stokes en las mismas unidades; F es el factor de Faxén; d es el diámetro de la esfera y D es el diámetro del tubo; ambos en metros.

El ámbito de uso del viscosímetro de Höppler es la industria química y farmacéutica, debido a que tiene gran precisión, también para fluidos no-newtonianos, y se puede utilizar en un rango de temperaturas de $-20^\circ C$ a $120^\circ C$. [16]

Viscosímetro De Caída De Cuerpo Cilíndrico. Para la medida de la viscosidad de un fluido newtoniano mediante la caída de un cuerpo cilíndrico, se utiliza la ecuación que desarrolló Dindar [17]:

$$\mu = \frac{t(\rho_s - \rho_l)(r_2^2 g)[(r_2^2 + r_1^2)\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) - (r_2^2 - r_1^2)]}{2L(r_2^2 + r_1^2)} \quad (2.22)$$

donde:

- μ es la viscosidad del líquido [$Pa \cdot s$]
- ρ_l es la densidad del líquido [$\frac{Kg}{m^3}$]
- ρ_s es la densidad del cuerpo cilíndrico [$\frac{Kg}{m^3}$]
- t es el tiempo que tarda en caer el cuerpo [s]
- L es la distancia vertical de caída [m]
- r_1 es el radio del cuerpo cilíndrico [m]
- r_2 es el radio interno del tubo por el que cae el cuerpo [m]

Cumpliendo la condición de que la relación de que el radio del cilindro y del tubo tengan una relación de al menos 0.93, podremos utilizar la ecuación 2.23, que ha sido simplificada. [18]

$$\mu = \frac{K(\rho_s - \rho_l)}{v_t} \quad (2.23)$$

donde:

- v_t es la velocidad terminal.
- K es la constante de calibración.
- ρ_s es la densidad del cuerpo cilíndrico.
- ρ_l es la densidad del líquido.

En cuanto a la K , es una constante de calibración que depende tanto del aparato utilizado y sus incertidumbres como de la temperatura y presión a la que se encuentre el fluido, y se puede calcular mediante un proceso de calibración para una sustancia de viscosidad conocida para después extrapolarla para cualquier líquido de propiedades semejantes. Todos estas propiedades se expresan en unidades del sistema internacional.

2.5.4. Metodología De La Caída De Cuerpo

El viscosímetro que se ha desarrollado a lo largo de este proyecto no se corresponde exactamente a ninguno de los tipos de viscosímetro de caída de cuerpo anteriormente explicados. Al tratarse de cuerpo con forma de bala, es decir, una semiesfera acomplada a un cilindro por lo que se puede ajustar, de forma conceptual, a un viscosímetro de caída de cuerpo cilíndrico.

Mediante el análisis del movimiento de caída de un cuerpo de estas características en relación a su peso y a la fuerza de rozamiento con el medio, se podrán obtener expresiones que definan la velocidad del cuerpo en función del tiempo y de su posición inicial, para poder desarrollar la técnica que se emplea en este viscosímetro.

Principio De Arquímedes. Como dice el principio de Arquímedes, un objeto parcialmente o totalmente sumergido en un fluido, sufre una fuerza de empuje ascendente equivalente al peso del fluido desplazado por el cuerpo. Por lo que, el empuje E es igual al producto de la densidad del fluido ρ_l por la aceleración de la gravedad g y por el volumen del cuerpo sumergido.

$$E = \rho_l \frac{4}{3} \pi R^3 g \quad (2.24)$$

Por otro lado, el peso del cuerpo resulta del producto de la aceleración de la gravedad g por la masa del cuerpo m , que esta masa a su vez es el producto de la densidad del sólido ρ_s por el volumen del cuerpo.

$$W = m \cdot g = \rho_s \frac{4}{3} \pi R^3 g \quad (2.25)$$

Después de la comparación de las expresiones del peso y empuje se concluye matemáticamente que el material del cuerpo debe tener mayor densidad que el fluido.

Y por último, con el fin de concretar para el caso del viscosímetro diseñado, se debe cambiar en las ecuaciones 2.24 y 2.25 el volumen de la esfera por el del cuerpo con forma de bala, que se expresa en la ecuación 2.26.

$$V_{total} = V_{semiesf} + V_{cilindro} = \frac{2}{3} \pi R^3 + \pi R^2 h \quad (2.26)$$

Fuerza De Rozamiento. Cuando un cuerpo se desplaza a través de un fluido aparece una fuerza contraria a dicho movimiento, que se denomina *fuerza de rozamiento*. Esta fuerza se origina a partir de los esfuerzos tangenciales y normales que aplica el fluido sobre la superficie del cuerpo sólido. Se recurre a la adquisición de datos experimentales para expresar la fuerza de rozamiento de la siguiente forma, en la que todos los terminos se expresan en unidades del sistema internacional:

$$F = \frac{1}{2} C_D \cdot \rho_l \cdot A \cdot v^2 \quad (2.27)$$

donde:

- F es la fuerza de rozamiento.

- A es el área de la sección transversal máxima del cuerpo perpendicular al flujo.
- C_D es el coeficiente de arrastre, según la forma geométrica del cuerpo y del valor del número de Reynolds.

Como se puede observar en la figura 2.18, cuyo trazado 1 representa de forma logarítmica la evolución del coeficiente de arrastre C_D en función del valor del número de Reynolds asociado al fluido de alrededor del cuerpo, este coeficiente evoluciona de forma compleja.

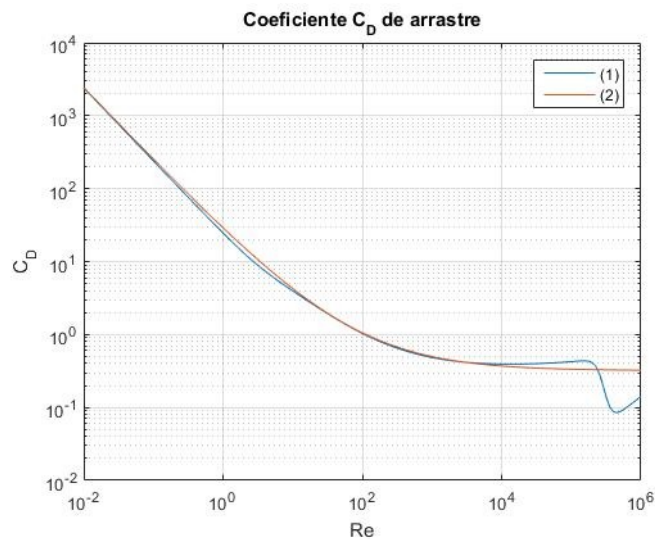


Figura 2.18: Variación del coeficiente de descarga en función del número de Reynolds. [20]

Ley De Stokes. A raíz de la ley de Stokes se puede determinar la fuerza de rozamiento de un objeto desplazándose a través de un fluido viscoso en un régimen laminar para un amplio intervalo de números de Reynolds. En la ecuación 2.28, para valores de números de Reynolds pequeños, predomina el primer término de la expresión.

$$C_D \approx \frac{24}{Re} + \frac{6}{1 + \sqrt{Re}} + 0.4 \quad (2.28)$$

Por lo que la fuerza de rozamiento sobre un cuerpo de forma esférica de radio R , para este rango de números de Reynolds se enuncia de la siguiente forma:

$$F = \frac{1}{2} \cdot \frac{24}{Re} \rho_l (\pi \cdot r^2) v^2 = 6 \cdot \pi \cdot r \cdot \mu \cdot v \quad (2.29)$$

Esta ecuación 2.29, es la conocida como *ley de Stokes*, que permite determinar la fuerza de rozamiento opuesta al movimiento de la esfera a través de un fluido para

$Re \leq 1$, el valor de esta fuerza de rozamiento resulta ser proporcional a la viscosidad del fluido, al radio de la esfera y a la velocidad de esta a través del fluido.

Dado que la sección transversal del cuerpo diseñado es igual a la de una esfera, la ecuación 2.29 es apropiada para este caso. Y puesto que el cuerpo se desplazará a lo largo de un eje vertical, las tres fuerzas que actuarán sobre el cuerpo estarán sobre el mismo eje y el equilibrio de fuerzas quedará como se muestra en la ecuación 2.30:

$$W = F + E \quad (2.30)$$

Después de sustituir las equivalencias de dichas fuerzas de las ecuaciones 2.24, 2.25 y 2.27, utilizando el volumen del cuerpo diseñado se obtiene una expresión parecida a la ecuación 2.23, en este caso con un coeficiente de calibración diferente, lo que implica que es posible obtener la viscosidad dinámica.

Capítulo 3

Materiales

3.1. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

Se trata de un viscosímetro de caída de cuerpo diseñado con el fin de medir la viscosidad de combustibles diésel en condiciones de alta presión y temperatura, por lo tanto está compuesto por diferentes subsistemas utilizados para, además de medir la viscosidad, gestionar y manipular las condiciones de presión y temperatura.

3.1.1. Exigencias De La Instalación

Para comprender las diferentes especificaciones del diseño de este viscosímetro es necesario conocer las dos principales exigencias de la instalación:

- En primer lugar, el sistema debe ser capaz de trabajar hasta 4000 bar de presión, ya que hoy en día los inyectores diesel trabajan hasta unos 3000 bar y conviene poder seguir utilizando este dispositivo en el caso que las presiones de trabajo de los inyectores siga esa tendencia alcista.
- En segundo lugar, poder desplazarse en un rango de temperaturas entre 0 °C y 85 °C , con el fin de simular las condiciones tanto de arranque en frío como de un funcionamiento normal del motor.

3.2. DESGLOSE DEL SISTEMA

A continuación se va a explicar el funcionamiento de cada elemento de la instalación empezando por una visión más general del sistema y después clasificando cada elemento, según su función, en cuatro subsistemas distintos.

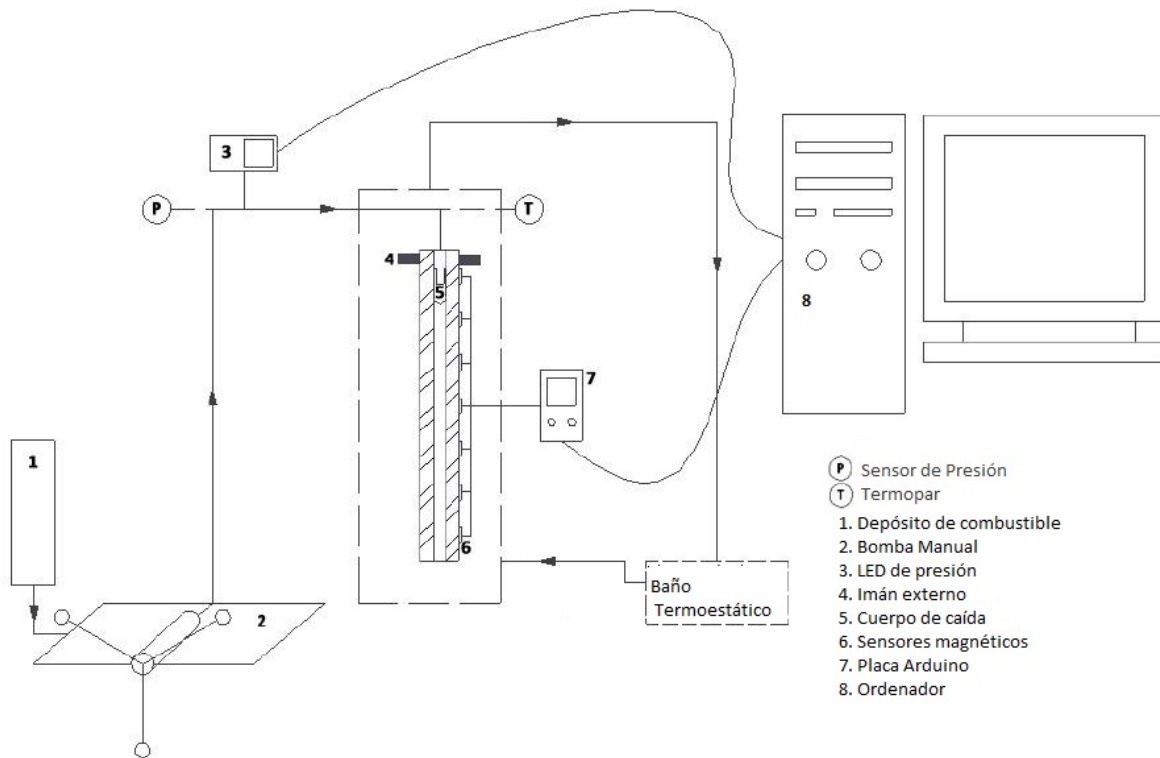


Figura 3.1: Representación esquemática de la instalación [21]

3.2.1. Esquema General

En la figura 3.1 se observa un esquema de la instalación en la que aparecen todos los elementos a los que se va a hacer referencia a continuación.

3.2.2. Cuerpo Del Viscosímetro

El cuerpo del viscosímetro se puede definir como el subsistema que contiene los elementos básicos para el funcionamiento del viscosímetro en el caso de no modificar las condiciones de presión y temperatura.

Los elementos que lo conforman son los siguientes:

- Tubo interior:** En la figura 3.2 se observa el tubo encargado de contener el cuerpo de caída, por lo que debe soportar altas presiones y temperaturas. Por otra parte debe en necesario que el tubo no influya en el campo magnético de los imanes, importante para no influir en las medidas realizadas. El material escogido es el acero inoxidable AISI 316 debido a cumplir con todos los requerimientos de la pieza.

Se trata de un tubo de 363 mm de longitud con un diámetro interior de 10 mm y un grosor de 1 mm.

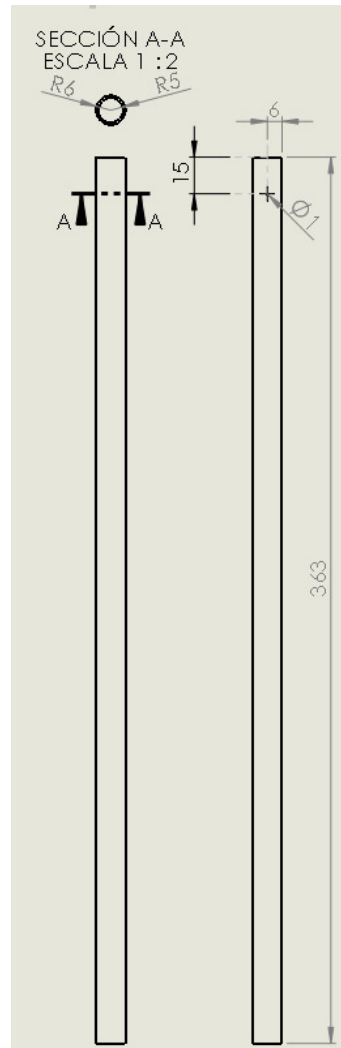


Figura 3.2: Plano del tubo interior.

- **Tubo exterior:** Esta pieza (figura 3.3) tiene como funciones principales la tarea de envolver el tubo interior y mantenerlo aislado del baño termoestático, para así evitar la contaminación del combustible, y soportar las altas presiones a las que se quiera medir en el futuro. Para ello se requiere un tubo que, con ayuda de las juntas de presión, resulte hermético y a su vez tenga una cavidad con tamaño suficiente para el tubo interior. El componente se completa con dos tapas que se sujetan mediante 8 tornillos cada una. Se trata de una superior, a través de la cual es introducido el combustible, y una inferior, la cual está completamente sellada. [27]
- **Juntas de presión:** Estas juntas de alta presión que se observan en la figura 3.4 se sitúan entre el tubo exterior y sus dos tapas, con el fin de conseguir que el tubo sea estanco. Para ello se tratan de unas juntas del fabricante Trelleborg [33], dentro de las cuales se han seleccionado las del tipo MOV, tipo que se puede observar en la figura 3.4, las cuales tienen un orificio por el cual entra el fluido,

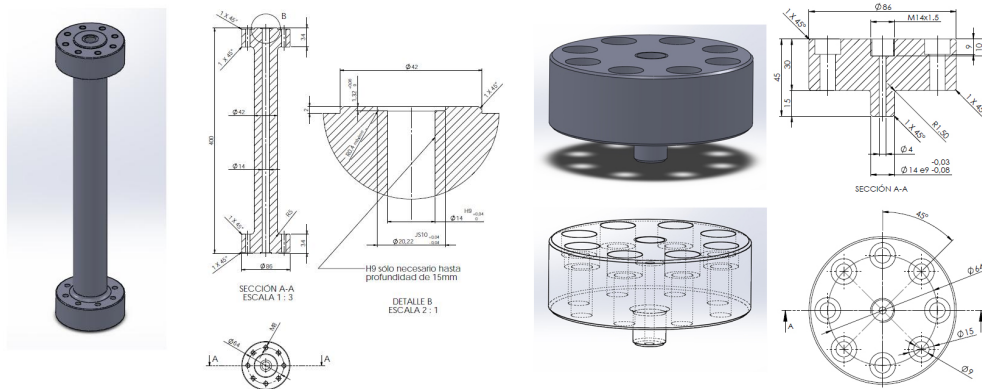


Figura 3.3: Diseño y planos del tubo exterior y sus correspondientes tapas. [27]

hace que la junta se expanda y consigue garantizar la estanqueidad, además soportan temperaturas de hasta 600°C y presiones de hasta 10000 bar. [27]

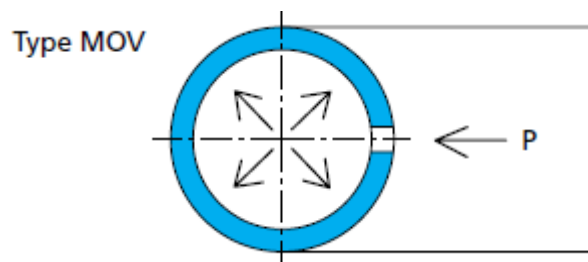


Figura 3.4: Esquema de las juntas de presión tipo MOV. [33]

- Juntas de teflón:** Estas juntas, diferenciadas en la figura 3.5, se sitúan en los límites superior e inferior del tubo con el fin de mantenerlo centrado y totalmente vertical. Se eligió el teflón como material para que así, las juntas puedan deformarse y de esta forma poder asegurar la estanqueidad de tubo cuando este se encuentre sometido a presión, por contra, es necesario sustituirlas cada vez que el sistema es desmontado.
- Imanes:** Proporcionados por la empresa SUPERMAGNETE [22], desde la cual han utilizado una aleación de neodimio, hierro y boro, que pese a tener un precio superior a la ferrita tiene una mayor fuerza de sujeción. Capaces de aguantar hasta una temperatura de 140°C . Habrán dos de ellos presentes en la instalación, uno de ellos en el interior del cuerpo de caída, y el otro en el extremo de una varilla con la que se podrá devolver el cuerpo de caída a su posición inicial.
- Cuerpo:** Este elemento, que se observa en figura 3.7, debe caer por el interior del tubo, y como se observa en la figura 3.6 tiene una geometría compuesta por una semiesfera unida a un cilindro, para garantizar la caída concéntrica por el

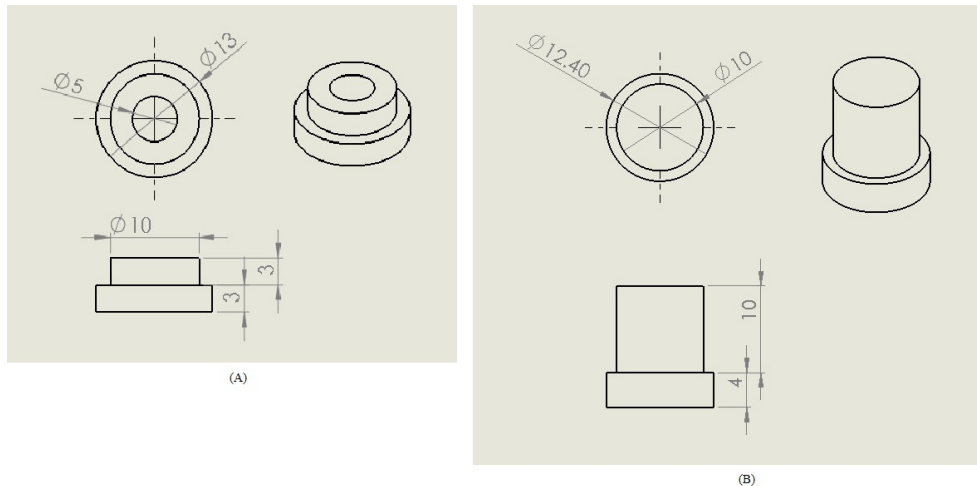


Figura 3.5: Junta de teflón superior (A) e inferior (B).



Figura 3.6: Representación de los imanes a utilizar. [22]

interior del tubo [38]. Al igual que el tubo, está fabricada en acero inoxidable AISI 316 y contiene un cavidad para introducir un imán en su interior para su detección por parte de los sensores magnéticos.

- Varilla de sujeción del imán exterior:** En la figura 3.8 se observa que se trata de una varilla de 80 cm de longitud, cuya función es mantenerse en una posición vertical y sujetar, mediante un casquillo, el imán que se utilizará para, una vez el cuerpo de caída este posado en el fondo del tubo interior, devolverlo a su posición inicial para poder realizar una nueva medida.

3.2.3. Sistema De Temperatura

El primer subsistema a tratar se encarga regular la temperatura del viscosímetro mediante dos intercambios de calor, el primero entre el fluido de trabajo del termo-regulador y el propio baño y a su vez este proporciona calor al tubo. Se trata de un

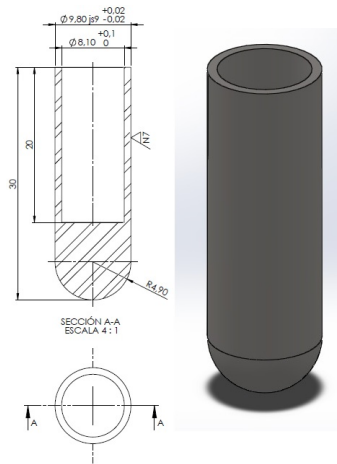


Figura 3.7: Plano y representación 3D del cuerpo de caída [23]



Figura 3.8: Varilla y casquillo utilizado para la sujeción del Imán

proceso de baño termostático que permite alcanzar la temperatura deseada y mantenerla estable a lo largo del tiempo si así se requiere.

Y los elementos que lo componen son:

- Base:** Este elemento, mostrado en la figura 3.9, podría haber sido clasificado tanto en el apartado anterior, *Cuerpo del viscosímetro*, como en este. Ya que por una parte cumple la función de mantener estable y vertical el tubo exterior del viscosímetro, cuya geometría lo dificulta en gran medida, para ello se ha diseñado con un agujero en el centro donde reposará el tapón roscado de la parte inferior. Además, junto con el Tubo de Metacrilato, tiene la función de formar el recipiente para el baño termoestático, este tubo se coloca en la ranura circular dispuesta en la parte superior. En pro de la comodidad y funcionalidad dispone de un agujero pasante el cual, junto con una válvula con llave de paso, facilitando así la evacuación del baño.

Esta pieza ha sido mecanizada en el torno del mismo Departamento de Máquinas y Motores Térmicos. Y el material elegido ha sido el PVC, debido al precio y resistencia del material.

- Tubo Metacrilato:** Como se ha comentado con anterioridad, esta pieza mostrada en la figura 3.10 es el recipiente del baño termoestático y contiene la mayoría

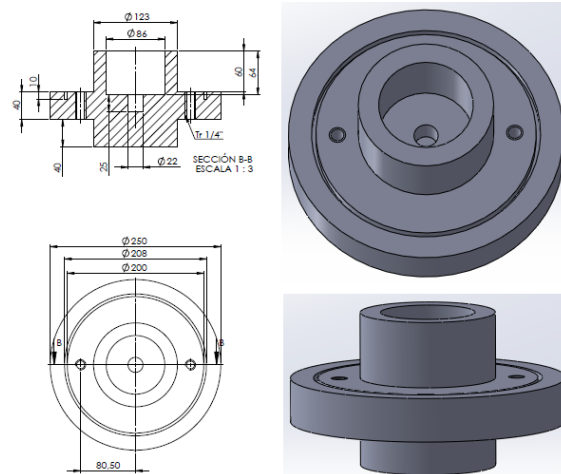


Figura 3.9: Planos y representación 3D de la base del viscosímetro. [24]

de las piezas que conforman el viscosímetro y del sistema de temperatura. Se trata de un tubo cilíndrico de 200 mm de diámetro interior y 4 mm de espesor y 700 mm de longitud, cuyas dimensiones están limitadas a las posibilidades de la empresa que ha suministrado el producto, en este caso Metaval Abellá S.L. [25]



Figura 3.10: Tubo de Metacrilato. [23]

Se ha utilizado Metacrilato para el tubo porque es un material resistente a rotura,

es transparente y cumple con las condiciones de trabajo a temperatura, ya que nuestra temperatura máxima de servicio son 85°C.

- **Tapa superior:** Esta pieza se observa en la figura 3.11 y al igual que la base, ha sido mecanizada en PVC por el Departamento de Máquinas y Motores Térmicos. Cumple la función de proteger el aceite del baño de posibles contaminantes y de la humedad, así como mejora el aislamiento térmico del baño.

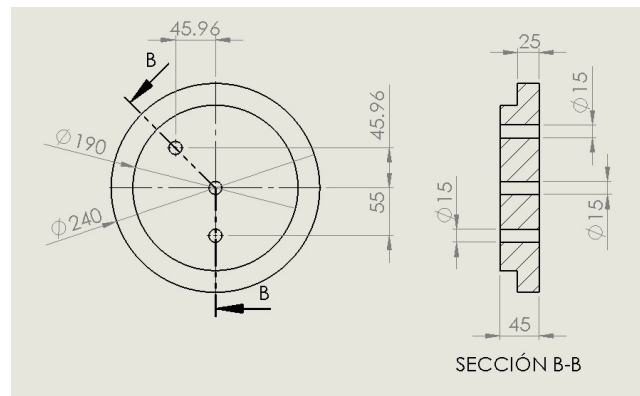


Figura 3.11: Diseño de la tapa superior del viscosímetro.

Por otra parte se han realizado diferentes agujeros para facilitar el paso de los conductos del intercambiador de calor, los cables de los sensores magnéticos, la sujeción de un termómetro para conocer en tiempo real la temperatura del aceite del baño y el manejo de la varilla imán con la que se reposiciona el cuerpo de caída.

- **Termorregulador:** Para poder aumentar la temperatura del baño termoestático se ha decidido utilizar el *Julabo MA-4* [26], el cual puede observarse en la figura 3.12, se trata de un termostato de circulación, el cual hace circular glicol a la temperatura deseada a través del serpentín, el cual funciona como un intercambiador de calor con el baño en el que encuentra sumergido el viscosímetro. Este aparato tiene un rango de acción que alcanza los 200°C, lo que cubre con creces las necesidades de este proyecto.
- **Serpentín:** Como se observa en la figura 3.13, se trata del tubo de acero inoxidable por el cual se trasegará el fluido impulsado por el termorregulador Julabo MA-4, con el fin de calentar el baño de aceite.
- **Fluido refrigerante:** El líquido que circula por el termorregulador es glicol, debido a que es un fluido disponible en el departamento y además puede trabajar a un rango de temperaturas adecuado a las necesidades del proyecto y no resulta perjudicial para ninguno de los elementos del circuito termorregulador-tubos-Serpentín.



Figura 3.12: Termostato de circulación Julabo MA-4



Figura 3.13: Serpentin. [27]

- **Aceite para el baño:** La función de este elemento es la de crear un entorno a la temperatura deseada sin dañar los elementos que componen el viscosímetro, por tanto, debe tratarse de un fluido aislante eléctrico, poseer buena estabilidad térmica y buenas propiedades ante la oxidación. Como requerimientos menos restrictivos, sería conveniente una viscosidad elevada para facilitar la limpieza de las piezas que estén en contacto con el aceite, y que este sea lo más transparente posible.

Por otra parte, analizando los materiales que componen los elementos que están en contacto con el aceite, únicamente la base de PVC podría llegar a ser atacado por el aceite cuando empieza a oxidarse. No supone un problema grave debido a que debería ser una exposición prolongada.

Después de sopesar todos los factores ya comentados, se escoge el aceite llamado Electra [28], que esta distribuido por Repsol. Se trata de un aceite ligero diseñado con el fin de utilizarse como aislante en equipos eléctricos. El hecho de estar sintetizado a partir de bases muy refinadas, y de ser tratado mediante hidrogenación para eliminar el azufre corrosivo de su composición, lo hace una buena elección para proteger los elementos metálicos y eléctricos.

3.2.4. Sistema De Adquisición De Datos

Los componentes que han sido elegidos para constituir este sistema persiguen la consecución de los datos de la forma más precisa posible. Tratando a su vez de mantenerse en un entorno cómodo y accesible para usuarios sin gran experiencia en la electrónica y de crear un sistema que no se vea afectado por las condiciones de temperatura ni por el contacto con los fluidos de trabajo como el aceite del baño termo estático.

Cumpliendo con estas premisas, se ha ideado un sistema en el que unos sensores magnéticos conectados a una placa arduino, los cuales funcionan como interruptores, detectan el momento exacto en el que el imán pasa por determinado espacio del tubo, y conocida la distancia entre los sensores se puede calcular la velocidad del cuerpo de caída.

Para proseguir, en el orden en el que viaja la señal detectada, se va a describir cada uno de los componentes del sistema:

- **Sensores Magnéticos:** Para la detección del paso del cuerpo de caída se optó por los sensores modelo PSC 175/30 COMUS ASSEMtech [29], los cuales pueden observarse en la figura 3.14, que funcionan como interruptor de láminas y un imán permanente. Cabe destacar determinadas características que han propiciado esta elección:



Figura 3.14: Sensor magnético de proximidad PSC 175/30 [29]

- Permite trabajar en un rango de temperaturas que abarca desde los -20°C hasta los 80°C . Rango que cubre las necesidades del sistema.
- Este modelo presenta orificios que facilitan la sujeción mediante tornillos, orificios los cuales facilitaron en gran medida el diseño del sistema de sujeción.

- Consta de un sellado completo para mantener el filamento conductor intacto.
- Se encuentra totalmente revestido en plastico, lo cual deja el sensor protegido.

Así pues, el conjunto de seis sensores del modelo PSC 175/30 COMUS ASSEMBtech serán dispuestos para la detección de la caída del proyectil, colocados a una distancia adecuada para que el imán no active dos sensores a la vez en su recorrido.

■ Sistema de sujeción:

Para poder mantener los sensores fijos en la posición deseada, además de poder realizar variaciones en la posición relativa entre los sensores, se diseñaron las siguientes piezas:

- **Placa de sujeción:** Se trata de la placa, la cual se observa en la figura 3.15, donde se van a situar los sensores, tiene 316 mm de longitud para abarcar el espacio longitudinal del tubo y poder ser colocada entre los dos soportes que serán descritos posteriormente. Consta de dos agujeros de 3.50 mm en cada extremo, para la sujeción en ambos soportes. Además de dos filas de otros 42 agujeros de 3.50 mm separados 7 mm a lo largo de toda la placa, los cuales se sirven para la sujeción de los sensores y la graduación de estos orificios permite cambios en la su posición de los sensores.

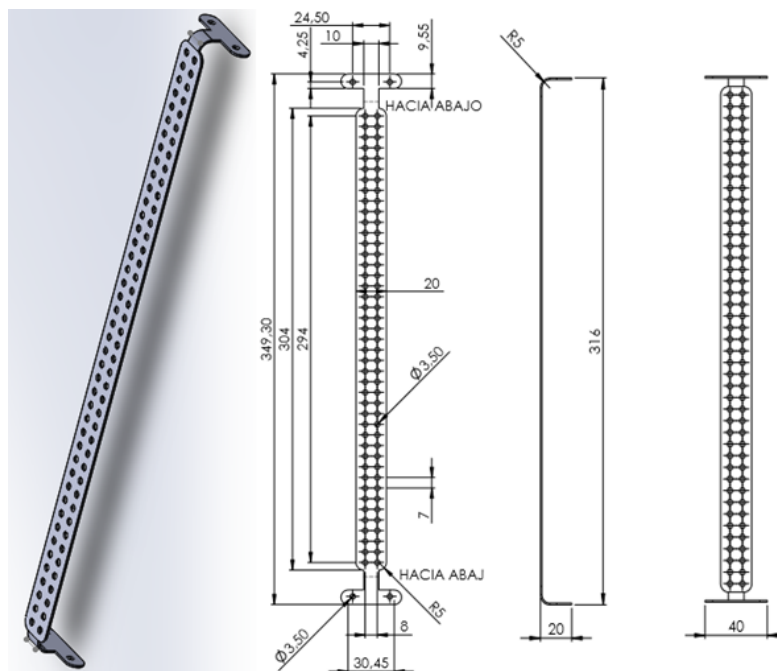


Figura 3.15: Diseño y planos de la placa de sujeción para los sensores. [24]

Se decidió realizar la placa en acero inoxidable AISI 316, ya que es un material barato, resistente a altas temperaturas y no es magnético. La pieza ha sido fabricada por la empresa lasertall [30], que mediante laser ha realizado todos los agujeros, y ofrecía el servicio de doblar las piezas, lo cual resultaba esencial para este elemento.

- **Soportes de la placa:** Este elemento ha sido diseñado con el fin de mantener fija la posición de la placa respecto al tubo exterior. Como se observa en la figura 3.16 se trata de una placa cuadrada que dispone de dos agujeros de 8.50 mm de diámetro, con los cuales estos soportes se fijan a los tornillos de las tapas superior e inferior del viscosímetro mediante cuatro tuercas de métrica 8.

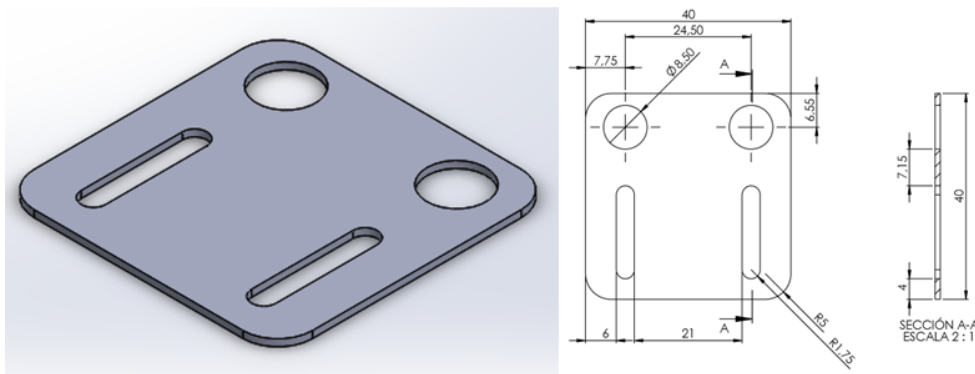


Figura 3.16: Diseño y planos de los soportes para la placa de sujeción. [24]

Por otra parte, poseen dos ranuras de 3.50 mm de diámetro, las cuales permiten realizar una sujeción guiada de la placa donde van situados los sensores. Estas piezas que están fabricadas en acero inoxidable AISI 316, por los mismos motivos que la placa de sujeción.

Mediante la combinación de estas dos piezas se consigue llevar los sensores a una posición fija situada lo más cercana posible al viscosímetro.

- **Placa de conexiones:** Conectada al extremo de los cables propios de los sensores se sitúa una placa de pruebas, es decir, una pequeña tabla de 150x50x10 mm constituida por un aislante, normalmente plástico, y un conductor. Está repleta de orificios interconectados eléctricamente por dicho material conductor. Las conexiones, habitualmente siguen patrones lineales, y esta placa se utiliza para realizar conexiones insertando cables e componentes electrónicos para así componer un circuito.

Se escogió esta forma de realizar las conexiones debido a la facilidad y rapidez del montaje para realizar pruebas con el circuito. Por otra parte no garantiza

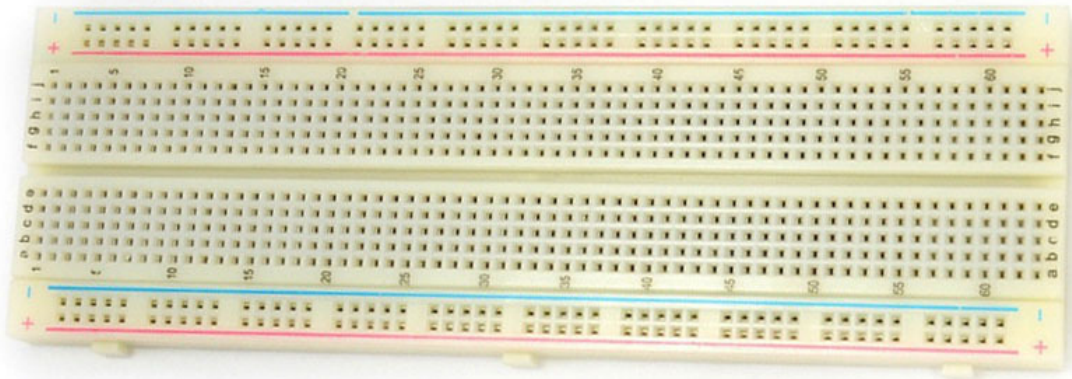


Figura 3.17: Placa de conexiones de 830 contactos. [31]

unas conexiones seguras y resistentes a posibles desconexiones, por tanto, los miembros del taller de electrónica del DMMT se plantea la elaboración de un circuito integrado que sustituya la placa de pruebas.

- **Resistencias:** En el montaje de la placa se utilizan resistencias del tipo *pull-down* de $1.8k\Omega$ y $7.2k\Omega$.
- **Cableado:** Se utilizan los puentes para prototipos transmitir la señal eléctrica que proviene de cada sensor a su correspondiente entrada en la placa de Arduino pasando a través de la placa de pruebas.
- **Placa Arduino Leonardo:** A causa de la disponibilidad en el departamento de este microcontrolador, se tomó la decisión de utilizar esta placa Arduino Leonardo, que dispone de 10 pines digitales, además de otros tantos analógicos. Cuenta también con un cristal oscilador e 16 MHz, y una conexión USB tipo Micro-B.

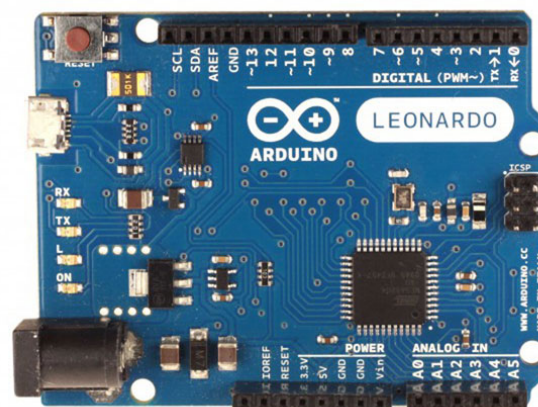


Figura 3.18: Placa Arduino Leonardo [32]

Las características de esta placa nos da la posibilidad de configurar los pines entrada y salida mediante software, así como conectarla directamente a un ordenador utilizando un cable de conexión USB (Micro-B a Tipo A) muy sencillo de obtener. Y así no necesitar una fuente de alimentación.

Por último, en la figura 3.19, se muestra el montaje de la placa arduino leonardo, junto a las resistencias y la placa de conexiones, de la cual salen los cables de los sensores.

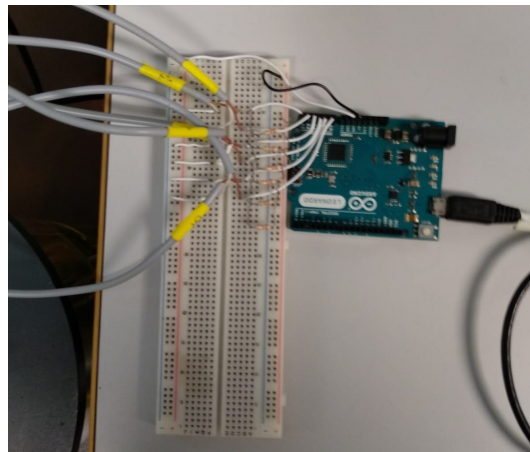


Figura 3.19: Montaje del sistema de adquisición de datos.

3.2.5. Sistema De Presión

El último sistema a añadir al viscosímetro está formado por los elementos cuya misión es suministrar y mantener los diferentes combustibles a la presión deseada por el usuario. Los dos elementos principales de este sistema ya forman parte del cuerpo del viscosímetro, que son el tubo exterior y las juntas de presión, y los mencionados en esta sección son para un montaje posterior en el que se vaya a aumentar la presión del combustible en los ensayos.

- **Sensor de presión:** En este contexto, es muy conveniente conocer la presión que existe entre la bomba y la entrada al viscosímetro. Para ello se planea utilizar un sensor WIKA-HP2-4000. el cual es capaz de medir hasta 5 la presión 5 veces por segundo. Su rango de medida alcanza los 4000 bar, lo que cumple con creces las necesidades de este proyecto. Por otra parte, se instalará un indicador LED numérico que informa del valor de presión que se está midiendo con una precisión de 4 dígitos. Ambos elementos se observan en la figura 3.20.
- **Bomba manual:** En la figura 3.21 se observa el elemento para poder presurizar el combustible, una bomba manual *Nova Swiss* [35]. Esta bomba puede alcan-



Figura 3.20: Sensor de presión WIKA HP2-4000 (A) y el LED WIKA A-LAL-1 (B) [34]

zar presiones de hasta 4000 bar, siendo muy precisa gracias a generar presión mediante un sistema de desplazamiento positivo de tornillo.

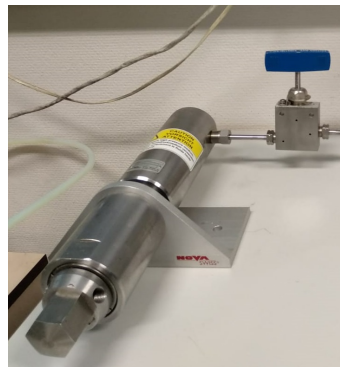


Figura 3.21: Bomba manual de alta presión nova swiss sin las manivelas montadas.

- **Líneas de alta presión:** Son conductos cuya función es trasegar a alta presión el combustible desde la bomba manual hasta el cuerpo del viscosímetro.
- **Depósito de combustible:** Se trata de un cilindro donde se encuentra el combustible que va a ser suministrado al viscosímetro mediante la bomba, el cual puede observarse en la figura 3.22.

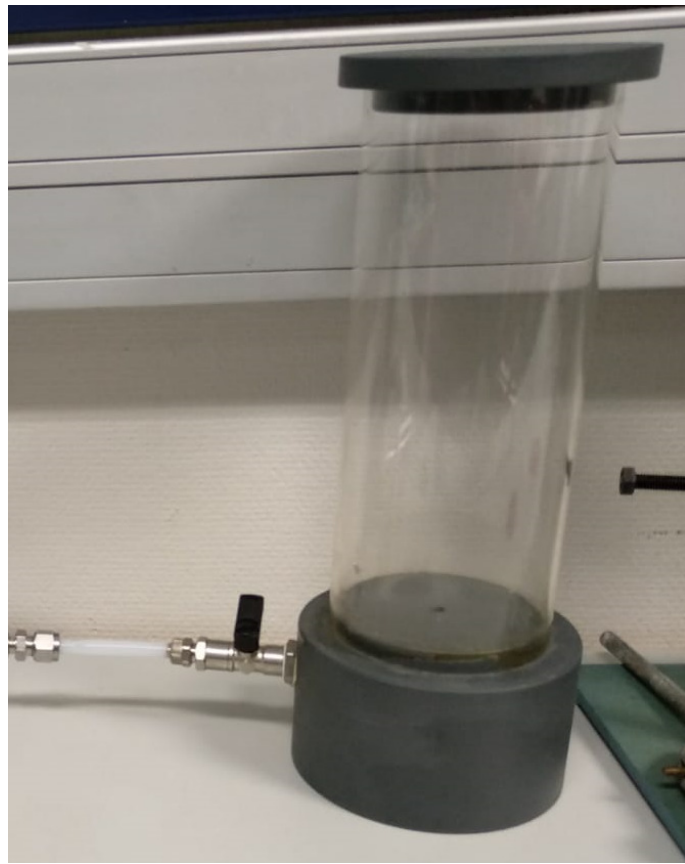


Figura 3.22: Depósito de combustible.

Capítulo 4

Calibración

4.1. INTRODUCCIÓN

Para alcanzar el objetivo de construir una curva de calibración para el viscosímetro, se pretende realizar medidas utilizando diferentes combustibles monocomponentes alcanos, de los cuales es conocida su viscosidad. Este proceso constará de, una vez montado el viscosímetro como se observa en la figura 4.1, medir cada combustible a presión ambiente, y en un rango de temperaturas desde la temperatura ambiente hasta 65°C.

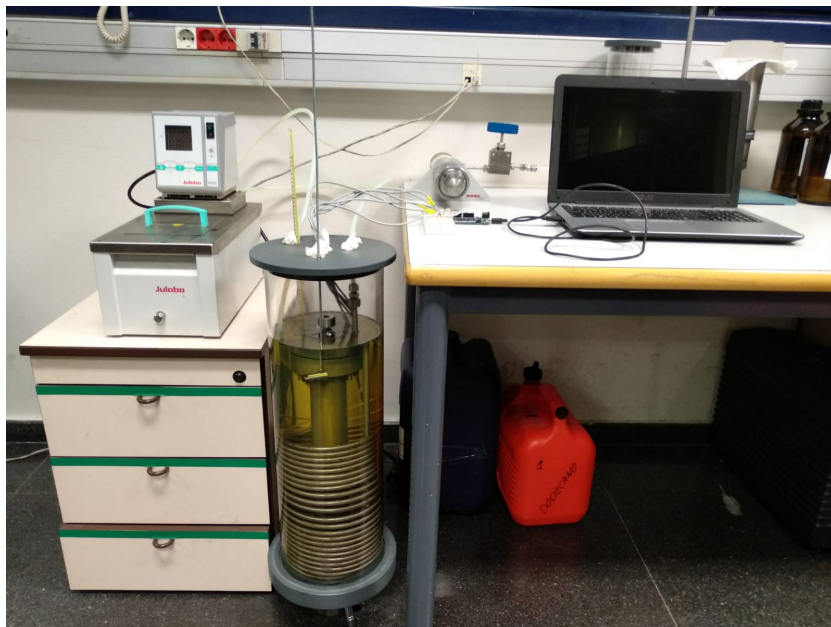


Figura 4.1: Montaje del viscosímetro preparado para ser utilizado.

A lo largo de este capítulo se explicarán los detalles y pasos a seguir del procedimiento de medida aplicado para medir Heptano, Octano, Decano, Dodecano y Hexadecano. Para más adelante continuar con el procesamiento de los datos para la posterior calibración.

4.2. PROCEDIMIENTO

A continuación se enumerarán los pasos a seguir cuando un usuario se disponga a realizar medidas en el viscosímetro, ya sea con el fin de calibrar como posteriormente para caracterizar un combustible.

Partiendo de la situación en la que se encuentra el tubo lleno del combustible deseado, con los sensores montados en el sistema de sujeción y sumergido en el baño termoestático a temperatura ambiente, con el termorregulador con una cantidad de glicol suficiente para su funcionamiento y conectado a la red eléctrica, los pasos a seguir son los siguientes:

1. En primer lugar, una vez comprobada la estanqueidad del baño tanto como que no existan fugas en las juntas del serpentín, encender el termorregulador y ajustar la temperatura deseada, una vez ajustada esperar a se alcance y estabilice la temperatura del baño.
2. Durante el proceso de calentamiento, conectar la placa arduino al ordenador y ejecutar el programa "detec_digital" y desplazar el cuerpo de caída utilizando la varilla, para poder comprobar la buena conexión de los sensores. Este programa de arduino funciona como se observa en la figura 4.2, de forma que envía al monitor serial la detección de cada uno de los sensores y así nos permite comprobar el correcto funcionamiento de todos los sensores para garantizar, en la medida de lo posible, que las siguientes medidas son fiables.

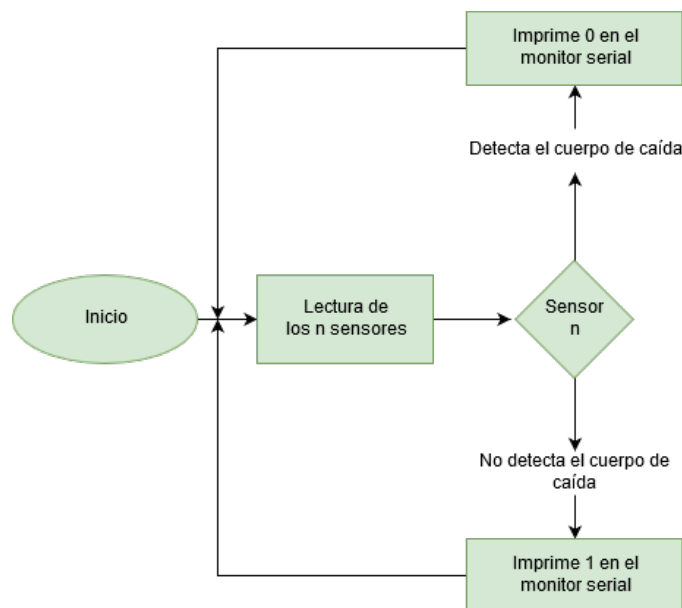


Figura 4.2: Diagrama de flujo del funcionamiento de programa de detección.

- Una vez se haya estabilizado la temperatura, se sube el cuerpo de caída mediante la varilla y una vez arriba, se ejecuta el programa "Timer_Procedure_Digital", y una vez listo se deja caer el cuerpo y se anota el resultado. Este programa, cuyo funcionamiento se observa en la figura 4.4, este programa se encarga de comprobar si el imán es detectado por el primer sensor y cuando este lo detecta almacena el tiempo mediante el reloj interno de la placa Arduino, una vez lo ha detectado realiza la misma acción con el siguiente sensor, una y otra vez, hasta llegar al último de los sensores. Por último, mediante una simple resta, realiza el cálculo de la diferencia de tiempo entre los sensores y las imprime en el monitor serial.

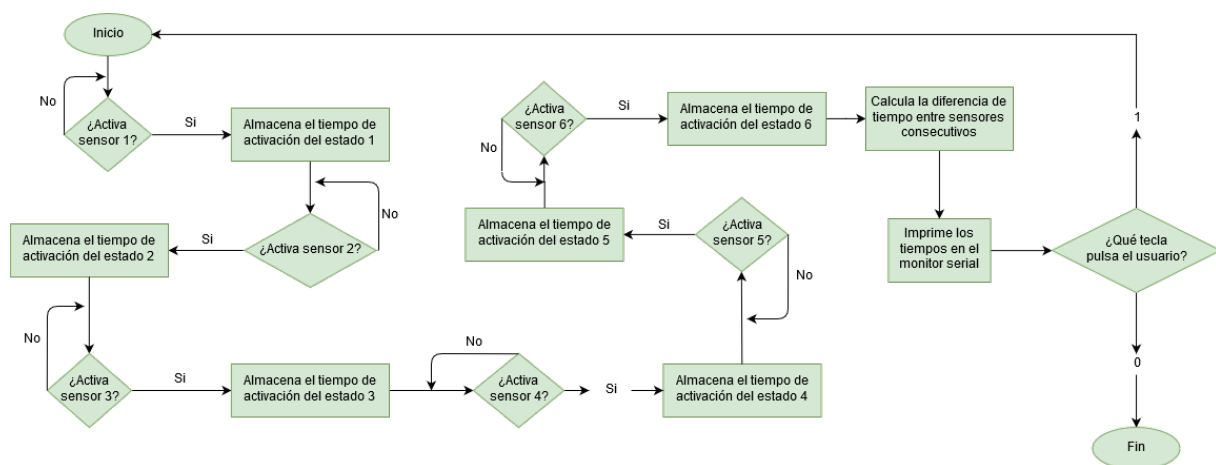


Figura 4.3: Diagrama de flujo del funcionamiento del programa de adquisición.

- Volver a subir el cuerpo de caída y preparar el programa para la siguiente medida siguiendo las instrucciones que aparecen en el monitor serial, volver a dejar caer el cuerpo y anotarlo. Este paso se repite tantas veces como medidas se quiera realizar. En este caso se han realizado 7 medidas para cada punto de temperatura.
- Habiéndose asegurado de haber anotado los resultados, cerrar el programa, apagar el termorregulador y desconectar la placa Arduino, o en caso de desear realizar nuevas medidas a una nueva temperatura, volver al paso uno.

4.3. POSTPROCESADO

En este apartado se pretende describir el proceso de postprocesado sobre los datos adquiridos hasta ahora, indagando tanto en el aspecto conceptual del proceso como en los diferentes matices matemáticos, prestando especial atención a los criterios con los cuales se van a calcular las rectas de las constantes de calibración para cada combustible.

4.3.1. Validación

El primer paso a realizar, es validar las medidas para demostrar que el cuerpo de caída alcanza una velocidad terminal durante el descenso por el tubo. Para ello, utilizando Matlab, se valida cada medida y a su vez se determina la velocidad terminal que alcanza el cuerpo. Cabe destacar que se ha tomado como criterio que una variación menor al 5% de la velocidad es despreciable, por lo tanto, cuando se da a lo largo de 3 sensores, se considera que se representa una estabilización de la velocidad.

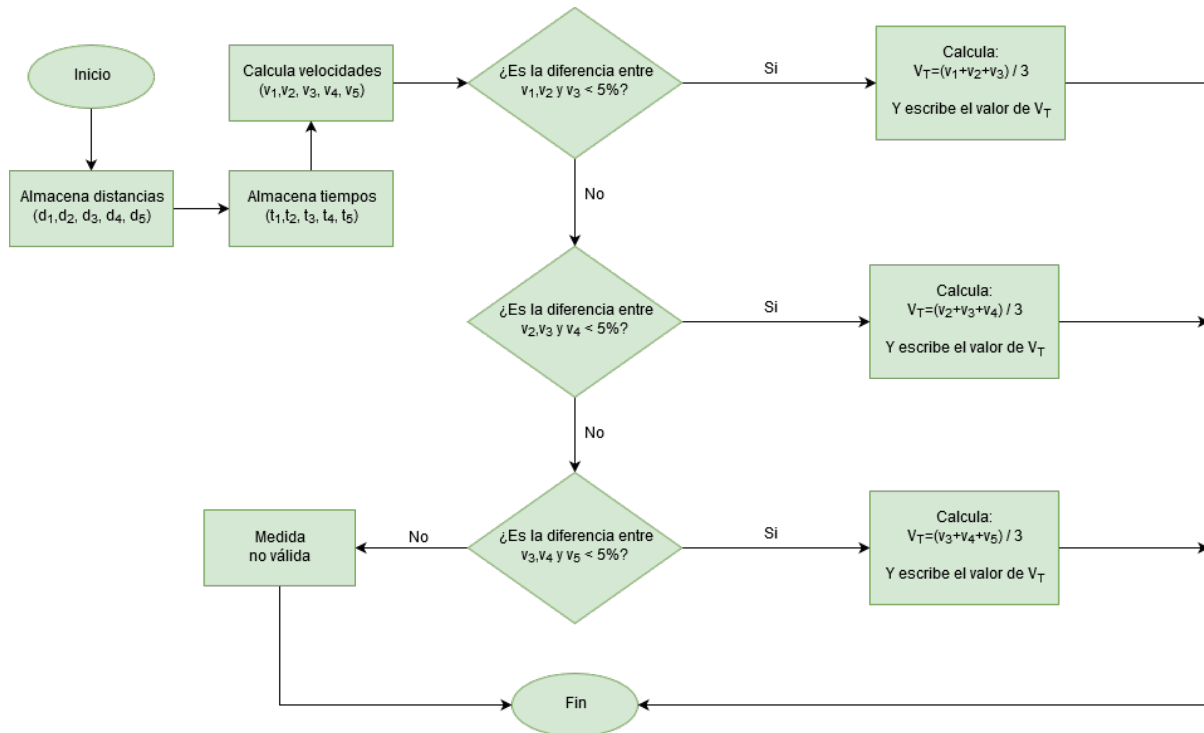


Figura 4.4: Diagrama de flujo del programa de validación.

Como se observa en la figura 4.4, el programa en primer lugar pide que se introduzca la distancia entre los sensores, y justo después los tiempos obtenidos mediante el programa de arduino "Timer_Procedure_Digital", con ello calcula la velocidad de cada tramo. A partir de aquí compara las velocidades consecutivas, para al fin, cuando se dan tres velocidades consecutivas con una variación menor o igual al 5%, determina como velocidad terminal la media aritmética de esas tres velocidades.

4.3.2. Análisis De La Repetitividad De Las Medidas

Una vez establecido el método para realizar las medidas, es necesario trabajar con el fin de comprobar si existe repetitividad en las medidas. Para ello se han analizado los resultados de dos formas, la primera es observar la semejanza de las medidas de una misma tanda ensayos, y la segunda es realizar un estudio de la repetitividad en ensayos realizados en diferentes días y condiciones.

4.3.3. Análisis De Las Medidas De Un Ensayo

Para analizar la repetitividad de las medidas es apropiado utilizar la desviación típica, ya que si esta es baja, significa que la dispersión de todos los puntos respecto de la media es pequeña.

Este cálculo debe aplicarse a cada ensayo, el cual está formado por siete medidas. Por lo tanto, la opción óptima es calcular la desviación típica de la media de los tiempos de cada sensor. Por otra parte se puede corroborar gráficamente que las medidas son válidas.

En los primeros ensayos del proyecto, se experimentó una falta de repetitividad en los resultados, por lo tanto se realizaron diferentes modificaciones para mejorar la repetitividad, como ajustar la posición de los sensores ya que se observó que alguno detectaba el imán con un pequeño desfase. Por otra parte se modificó el programa de medida para que realizara los cálculos de tiempo una vez acabado el paso del cuerpo de caída por el tubo.

En cuanto a los resultados, se han tomado como aceptables aquellos ensayos con una desviación típica con un orden de magnitud de la diezmilésima parte de la unidad. Por ejemplo en el ensayo con Octano a 45°C que se observa en la figura 4.5.

1º Ensayo 0,96 (Octano) Temperatura 45°C														
		D acumulada	#1 (ms)	#2 (ms)	#3 (ms)	#4 (ms)	#5 (ms)	#6 (ms)	#7 (ms)					
d12 (mm)	28	28	664	664	658	657	654	650	648					
d23 (mm)	28	56	663	708	656	677	657	673	697					
d34 (mm)	28	84	682	685	682	680	685	676	677					
d45 (mm)	28	112	686	682	681	674	694	672	668					
d56 (mm)	28	140	687	677	677	678	676	677	665					
										Media total				
										0.04156461				
										Media	Media total	Desviación n	Desviación típica	
			vt1 (m/s)	0.04216867	0.04216867	0.04255319	0.04261796	0.04281346	0.04307692	0.04320988	0.04265839	0.00664	0.00554	0.00063
			vt2 (m/s)	0.04223228	0.03954802	0.04268293	0.04135894	0.04261796	0.04160475	0.04017217	0.04145958	0.00544		
			vt3 (m/s)	0.04105572	0.04087591	0.04105572	0.04117647	0.04087591	0.04142012	0.04135894	0.04111697	0.00510		
			vt4 (m/s)	0.04081633	0.04105572	0.04111601	0.04154303	0.04034582	0.04166667	0.04191617	0.04120853	0.00519		
			vt5 (m/s)	0.04075691	0.04135894	0.04135894	0.04129794	0.04142012	0.04135894	0.04210526	0.04137958	0.00536		

Figura 4.5: Datos de un ensayo realizado con Octano a 45°C.

Una vez obtenidos valores de desviación típica de un orden de magnitud similar al que se observa en la figura 4.5, o incluso un poco mayor, se puede corroborar gráficamente que las medidas han sido repetitivas y tienden a una velocidad terminal, como se puede observar en la figura 4.6.

Una vez se consiguen resultados aceptables se procede a realizar la recolección de datos necesaria para calcular la constante de calibración.

4.3.4. Análisis De Las Medidas De Ensayos Diferentes

Una vez se ha confirmado la repetitividad de las medidas de un mismo ensayo, es momento de estudiar esta propiedad en ensayos realizados en días diferentes. El objetivo de este estudio es confirmar que la realización de cambios en el montaje del viscosímetro no presenta una influencia en los ensayos de un determinado combustible.

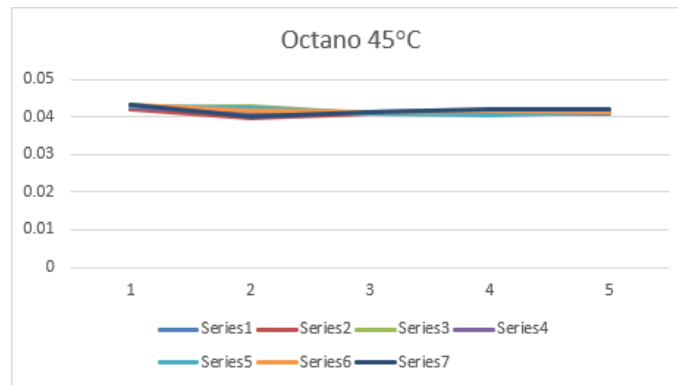


Figura 4.6: Representación gráfica del ensayo realizado con Octano a 45° C.

Para este estudio se van a utilizar medidas realizadas con Heptano a 35°C, debido a que en el proceso de calibración se realizaron ensayos con este combustible en diferentes días. En primer lugar, en la figura 4.7, se observan los dos bloques de 7 medidas realizadas en días diferentes habiendo desmontado el aparato entre ambos ensayos.

1º Ensayo 0,96 - Heptano - Temperatura 35°C														
		D acumulada	#8 (ms)	#9 (ms)	#10 (ms)	#11 (ms)	#12 (ms)	#13 (ms)	#14 (ms)					
d12 (mm)	28	28	601	599	610	638	659	594	626					
d23 (mm)	28	56	625	630	627	614	615	583	609					
d34 (mm)	28	84	617	604	609	597	601	611	599					
d45 (mm)	28	112	614	620	613	613	614	606	608					
d56 (mm)	28	140	637	631	627	597	599	602	604					
										Media total				
										0.045707749				
										Media	Media total	Desviación	Desviación típica	
			vt1 (m/s)	0.04658902	0.04674457	0.04590164	0.04388715	0.04248862	0.04713805	0.04472843	0.04535393	0.00035	0.00022	0.00033
			vt2 (m/s)	0.0448	0.04444444	0.0446571	0.04560261	0.04552846	0.04802744	0.04597701	0.04557672	0.00013		
			vt3 (m/s)	0.04538088	0.04635762	0.04597701	0.04690117	0.04658902	0.04582651	0.04674457	0.04625383	0.00055		
			vt4 (m/s)	0.04560261	0.04516129	0.045677	0.045677	0.04560261	0.04620462	0.04605263	0.04571111	0.00000		
			vt5 (m/s)	0.04395604	0.04437401	0.0446571	0.04690117	0.04674457	0.04651163	0.04635762	0.04564316	0.00006		

2º Ensayo 0,96 - Heptano - Temperatura 35°C														
		D acumulada	#1 (ms)	#2 (ms)	#3 (ms)	#4 (ms)	#5 (ms)	#6 (ms)	#7 (ms)					
d12 (mm)	28	28	598	655	639	617	640	634	629					
d23 (mm)	28	56	630	617	639	606	600	635	622					
d34 (mm)	28	84	644	622	630	599	611	640	614					
d45 (mm)	28	112	608	612	606	612	589	609	606					
d56 (mm)	28	140	638	609	610	588	614	643	611					
										Media total				
										0.04524365				
										Media	Media total	Desviación	Desviación típica	
			vt1 (m/s)	0.04682274	0.04274809	0.04381847	0.04538088	0.04375	0.04416404	0.0445151	0.04445705	0.00079	0.00048	0.00065
			vt2 (m/s)	0.04444444	0.04538088	0.04381847	0.04620462	0.04666667	0.04409449	0.04501608	0.04508938	0.00015		
			vt3 (m/s)	0.04347826	0.04501608	0.04444444	0.04674457	0.04582651	0.04375	0.04560261	0.04498035	0.00026		
			vt4 (m/s)	0.04605263	0.04575163	0.04620462	0.04575163	0.0475382	0.04597701	0.04620462	0.04621148	0.00097		
			vt5 (m/s)	0.04388715	0.04597701	0.04590164	0.04761905	0.04560261	0.04354588	0.04582651	0.04547998	0.00024		

Figura 4.7: Dos bloques de medidas con Heptano a 35° C.

Se observa que pese a ser medidas realizadas en días y condiciones de montaje diferentes, se obtienen resultados de velocidad muy similares, además de una desviación típica del mismo orden de magnitud en ambas tandas. Por otra parte se puede realizar una comprobación visual mediante a una representación gráfica de la velocidad.

Como se puede observar en la figura 4.8, la velocidad del cuerpo de caída se mantiene cercana en todo momento a 0.045 m/s, cosa que confirma, junto con la comparación del promedio de los diferentes días en la figura 4.9, que los resultados de ensayos realizados situaciones de montaje diferentes son coherentes y repetitivos.

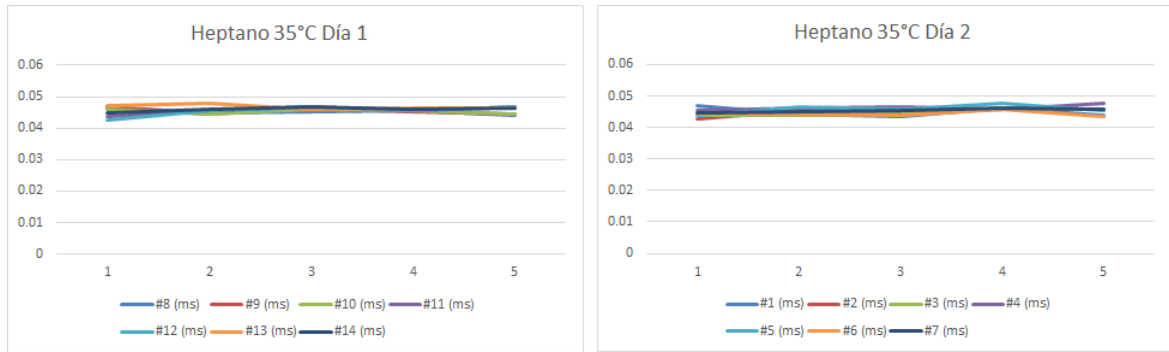


Figura 4.8: Representación gráfica de la velocidad en los ensayos con heptano a 35°C.

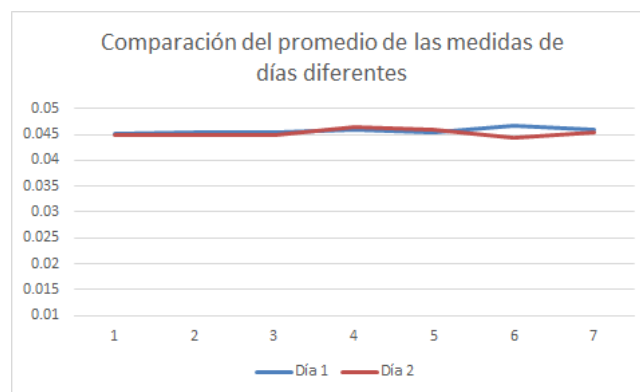


Figura 4.9: Comparación de los promedios de las medidas del heptano en distintos días.

4.3.5. Recopilación De Datos

Una vez se confirma que los datos obtenidos de medir los diferentes combustibles son válidos, el siguiente paso es la consecución del resto de datos necesarios para los cálculos próximos.

En primer lugar, la presión y la temperatura son conocidas, ya que se han realizado las medidas a presión ambiente, es decir 0.1 MPa, y la temperatura es la establecida por el usuario para los diferentes puntos a ensayar, en este caso, 25°C, 35°C, 45°C, 55°C y 65°C.

Por otra parte, la Densidad del cuerpo de caída es sencilla de obtener, ya que existe la posibilidad de pesar el cuerpo y medir sus dimensiones con gran precisión, para así calcular su volumen y después su densidad. Para ello solo se necesitan conocer las siguientes fórmulas:

- Una vez conocidas las dimensiones y la masa del cuerpo de caída, se calcula el volumen de la parte cilíndrica del cuerpo:

$$V_{cilindro} = \pi r^2 h \quad (4.1)$$

Ecuación en la cual se utilizan los datos del radio(r) y altura(h) del cilindro, ambos en metros.

- El siguiente paso, es calcular el volumen de la parte semiesférica, para luego, sumando los dos calculos previos obtener el volumen total del cuerpo de caída:

$$V_{semiesfera} = \frac{2}{3}\pi r^3 \quad (4.2)$$

$$V_{total} = V_{cilindro} + V_{semiesfera} \quad (4.3)$$

En este paso, se vuelve a recurrir al valor del radio(r), y a posteriori se obtiene el Volumen total en metros cúbicos.

- Por último, conocidos el valor de la masa [Kg] y el volumen total [m^3], obtenemos la densidad [Kg/m^3] del cuerpo de caída:

$$\rho = \frac{masa}{V_{total}} \quad (4.4)$$

El siguiente paso es averiguar los datos de Densidad y Viscosidad reales de los combustibles en función de la temperatura. Lo que se va a realizar de dos formas diferentes en función del combustible a tratar.

En primer lugar, cuando se trata de Heptano, Octano, Decano o Dodecano, se obtiene esa información de la base de datos del Instituto Nacional de Estándares de Tecnología [36], el cual está situado en Estados Unidos. En primer lugar se establecen las unidades deseadas, se elige el fluido y el tipo de propiedades que en este caso son siempre isobaricas. A continuación se fija la presión deseada, el rango e incremento de temperatura y se obtienen los valores deseados de viscosidad y densidad, ya sean los datos tabulados o de forma gráfica, que como se observa en la figura 4.10, se obtiene el dato numérico pasando el cursor por el punto deseado.

En el caso del Hexadecano, cuyos datos no se encuentran en las diferentes bases de datos conocidas, se ha recurrido a datos experimentales disponibles en la literatura [37], a partir de los cuales se ha calculado los datos necesarios mediante las las ecuaciones de las líneas de tendencia, lineal en el caso de la densidad y exponencial en el caso de la viscosidad. Como se observa en la figura 4.11.

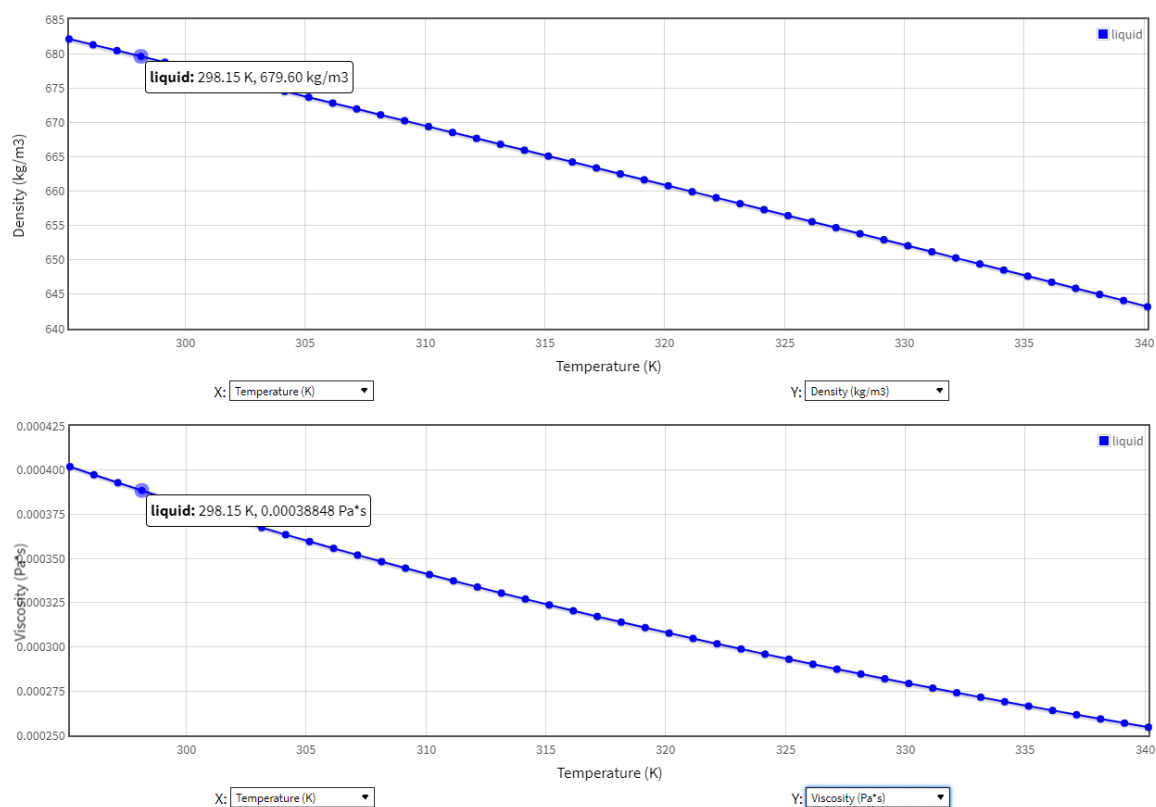


Figura 4.10: Gráficas de viscosidad y densidad en función de la temperatura. [36]

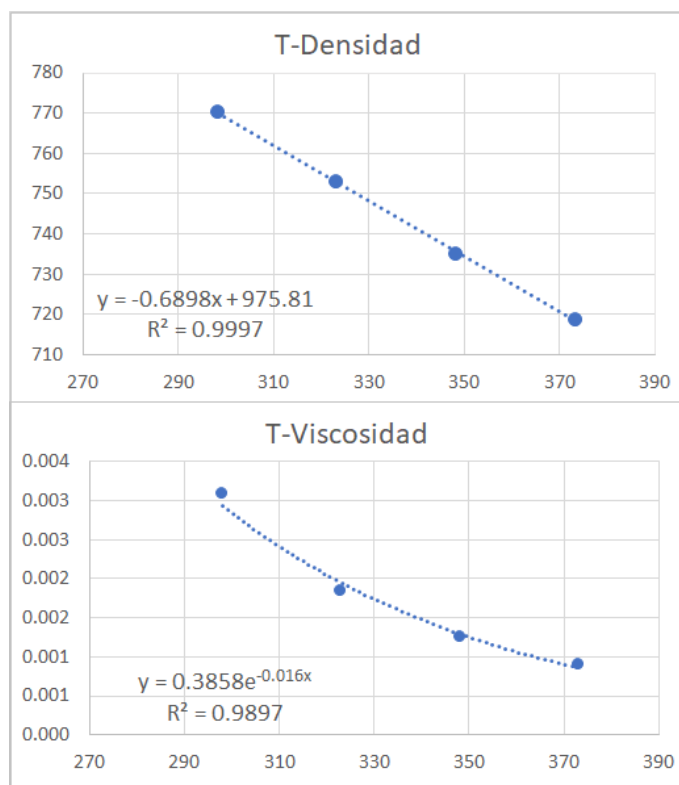


Figura 4.11: Gráficas para el cálculo de las propiedades del Hexadecano.

4.3.6. Constante De Calibración

Llegado este punto, se han obtenido todos los datos necesarios para calcular la constante de calibración, paso que se realizará para todos los combustibles con el fin de observar el comportamiento de todos ellos a la hora de calcular la viscosidad del resto de combustibles, se calcula mediante la ecuación 4.5:

$$K = \frac{v_t \cdot \mu}{\rho_c - \rho_f} \quad (4.5)$$

Donde:

- v_t es la velocidad terminal en m/s .
- μ es la viscosidad real del combustible en $Pa \cdot s$.
- ρ_c es la densidad del cuerpo de caída en kg/m^3 .
- ρ_f es la densidad del fluido en kg/m^3 .

Una vez calculada esta constante, se construye la recta de calibración para cada combustible. Para ello, existen dos métodos. Se decidirá cual resulta más efectivo una vez se obtengan resultados.

Primer Método. Este método consiste en construir la recta de calibración para cada sustancia a partir de graficar todas las constantes de calibración en función de la temperatura, obtenidas de calcular una velocidad terminal para cada medida, por lo que en este caso quedan diferentes puntos superpuestos en la misma temperatura, como se observa en la figura 4.12. Lo característico de este método es el hecho de promediar al final, habiendo tenido presentes todos los datos en todo momento.

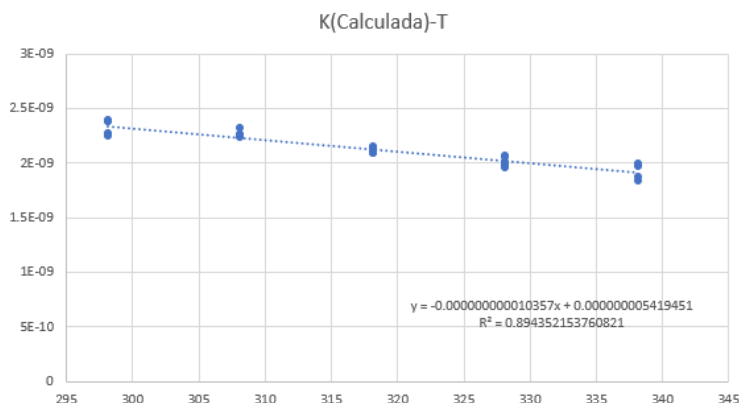


Figura 4.12: Recta de calibración del Heptano construida con el primer método.

Segundo Método. En este caso se procede a promediar todos los puntos de cada temperatura antes de construir la gráfica, en la cual queda un valor de constante por cada temperatura, como se observa en la figura 4.13.

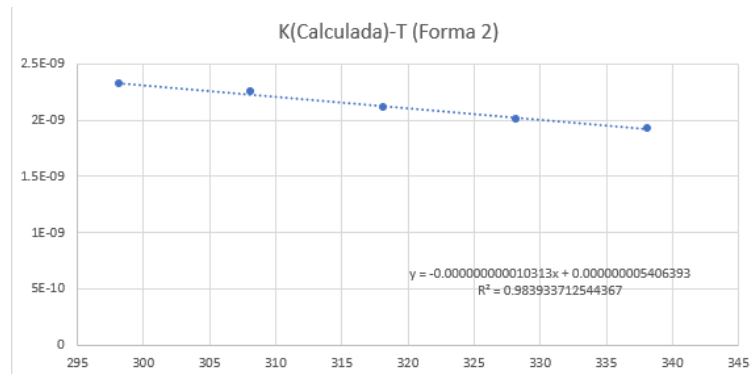


Figura 4.13: Recta de calibración del Heptano construida con el segundo método.

4.3.7. Cálculo De Viscosidad Y Error

Con las ecuaciones que se muestran en las figuras 4.12 y 4.13, se procede a calcular las constantes de calibración para todas las temperaturas, para cada sustancia dada, y así calcular las viscosidades del resto de combustibles mediante la siguiente ecuación:

$$\mu = \frac{K_c \cdot (\rho_c - \rho_f)}{v_t} \quad (4.6)$$

Donde:

- v_t es la velocidad terminal de los ensayos del combustible a calcular en m/s .
- K_c es la constante de calibración calculada mediante el combustible de calibración.
- ρ_c es la densidad del cuerpo de caída en kg/m^3 .
- ρ_f es la densidad del fluido a calcular en kg/m^3 .

Acto seguido, solo queda comparar la viscosidad recién calculada en la ecuación 4.6 con los datos de viscosidad real del combustible a calcular, para poder observar el error de la viscosidad calculada respecto a la teórica de la siguiente manera:

$$\varepsilon = \frac{|\mu_r - \mu_c|}{\mu_r} \cdot 100 \quad (4.7)$$

Donde:

- μ_r es el dato de viscosidad real del combustible en $Pa \cdot s$.
- μ_c es la viscosidad calculada del combustible en $Pa \cdot s$.

Una vez obtenidos los errores en la viscosidad de diferentes combustibles a partir de la constante de calibración calculada con los datos de los ensayos realizados con esos mismos combustibles, se pudo observar que el error aumenta conforme aumenta la diferencia de cadenas de hidrocarburos que poseen los combustibles, lo que acaba estableciendo al Hexadecano como un combustible demasiado diferente al resto, es decir, con un error no admisible. Una vez llegada a esta conclusión, como se verá en el siguiente capítulo, se afronta el último paso de construir una recta de calibración que abarque el conjunto de todos los combustibles ensayados.

Capítulo 5

Resultados

5.1. INTRODUCCIÓN

A lo largo de este capítulo se pretende explicar los criterios adoptados y los pasos a seguir para la consecución del objetivo final de este proyecto, la elaboración de una recta de calibración para la instación experimental a partir de datos de diferentes combustibles, una recta con un mayor espectro de utilización para su aplicación a la determinación de la viscosidad de combustibles de automoción. Tratando primero los aspectos teóricos para después abordar los resultados matemáticos.

5.2. PASOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA RECTA DE CALIBRACIÓN

5.2.1. Elección De Los Combustibles

En primer lugar, para construir la recta de calibración, se ha de tomar la decisión de qué combustibles utilizar. En este caso se van a utilizar tres, concretamente el Octano, Decano y Dodecano, debido a que se ha llegado a la conclusión de que el hexadecano es un fluido demasiado diferente en sus propiedades al resto de los combustibles ensayados. Dejando fuera de la recta también al Heptano, para realizar la curva con los tres combustibles intermedios, en cuanto al número de cadenas de hidrocarburos que tienen.

5.2.2. Recta De Calibración

Una vez tomada la decisión anterior, se construye la recta de calibración con los datos obtenidos de los tres combustibles, utilizando cualquiera de los métodos explicados en el capítulo 4, debido a que no existe una diferencia apreciable en los resultados.

En la figura 5.1 se observan ambas rectas con sus respectivas ecuaciones 5.1 y 5.2, las cuales se ven comparadas a continuación, y se observa que la diferencia de los coeficientes es despreciable.

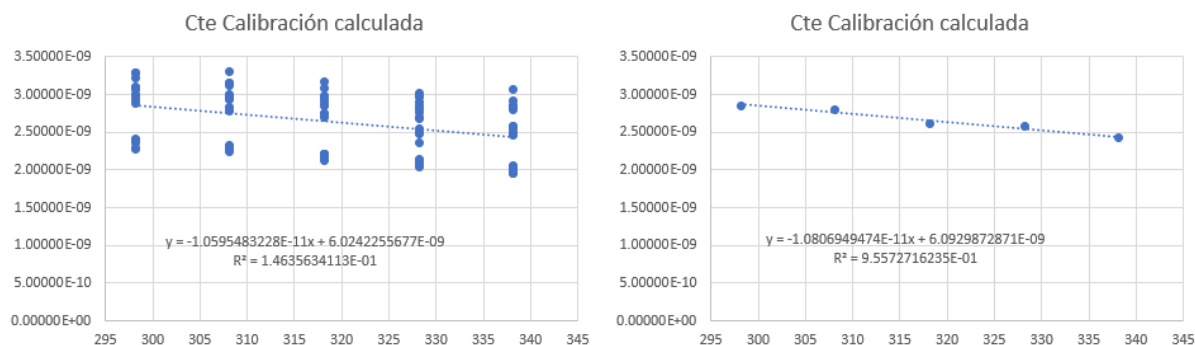


Figura 5.1: Gráfica y ecuación de la recta de calibración.

$$y = -1.0595483228 \cdot 10^{-11} \cdot T + 6.0242255677 \cdot 10^{-9} \quad (5.1)$$

$$y = -1.0806949474 \cdot 10^{-11} \cdot T + 6.0929872871 \cdot 10^{-9} \quad (5.2)$$

El siguiente paso es calcular la viscosidad de cada combustible para cada temperatura mediante las ecuaciones 5.1 y 5.2. Dichos valores constituyen el principal resultado de este proyecto, al tratarse de la viscosidad determinada experimentalmente. Por tanto, resultará interesante compararlos con la viscosidad conocida de cada combustible. Ello permitirá determinar la precisión del equipo de medida calibrado.

5.3. RESULTADOS

Una vez obtenida la recta de calibración se procede al cálculo de la viscosidad de cada combustible, y su comparación con la viscosidad teórica de este, comparación que se puede observar en la figura 5.2.

A partir de estos datos podemos observar que el proceso de medida ha capturado la tendencia decreciente de la evolución de la viscosidad de los combustibles en función de la temperatura. Se observa una menor precisión en el caso del Hexadecano, cosa que ya se esperaba por los datos obtenidos anteriormente, y en cuanto al Octano, cabe destacar que es el único combustible en el que se sobreestima el valor de la viscosidad calculada, seguramente debido a que posee unos valores de viscosidad relativamente bajos y a que el decremento de su valor de viscosidad respecto a la temperatura es más acusado que en el resto de combustibles.

El siguiente paso es calcular el error de la viscosidad medida respecto a la real, el cual se observa en la figura 5.3, mediante el proceso desarrollado en las últimas secciones del capítulo 4.

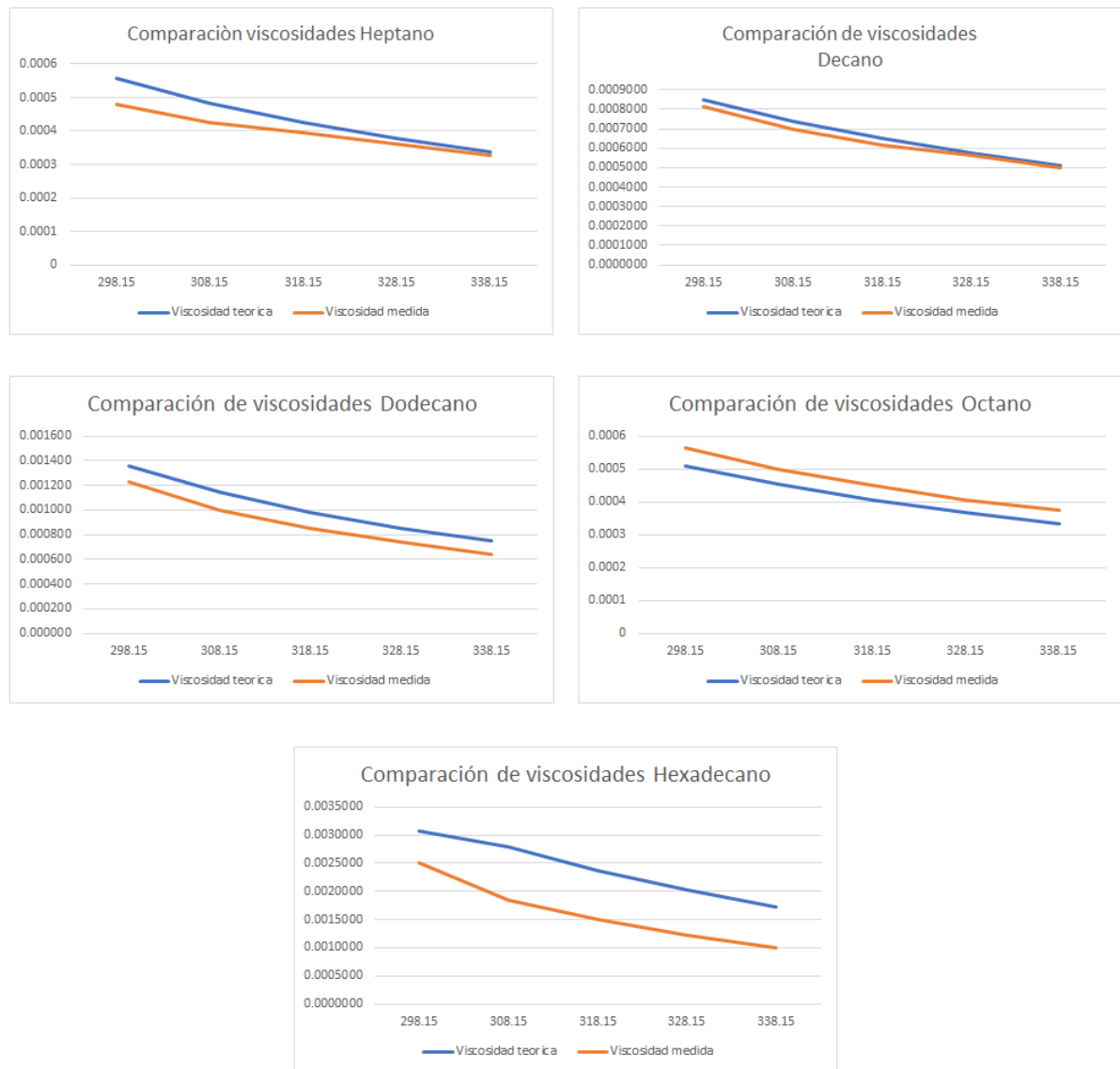


Figura 5.2: Comparación entre la viscosidad medida y teórica de los combustibles ensayados.

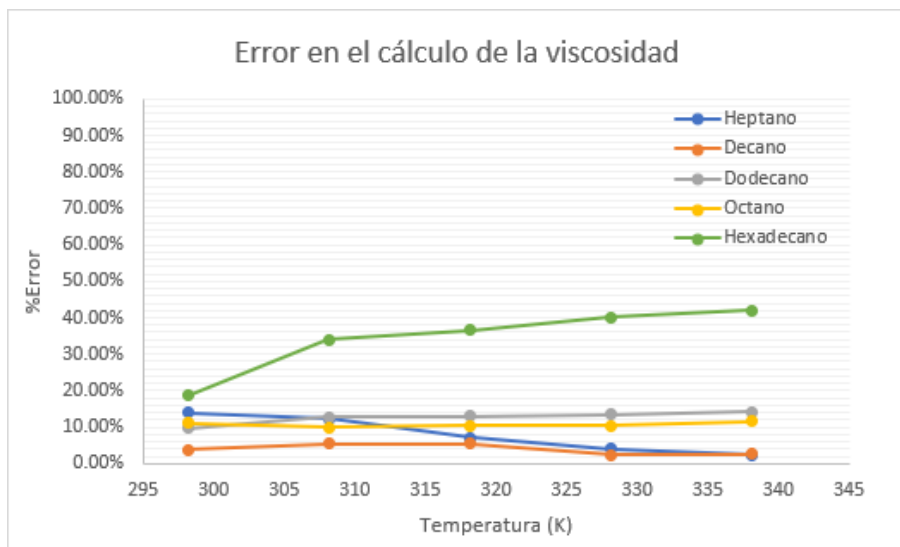


Figura 5.3: Error de la viscosidad medida de cada combustible

5.3.1. Análisis De Los Resultados

Analizando los resultados obtenidos se observa que, como se había predicho en partes anteriores del proyecto, el Hexadecano alcanza unos valores de error inaceptables, ya que en los puntos de mayor temperatura superan el 40 %, debido a que se trata de una sustancia con unas propiedades muy diferentes al resto de combustibles. En el caso opuesto, los errores en el cálculo de la viscosidad del Decano se sitúan entre el 2 % y el 5 %. Por otra parte, el Heptano y el Dodecano se comportan de forma similar, hecho que tiene sentido debido a que son los combustibles que cierran la recta de calibración en los valores bajos y altos respectivamente, tienen unos valores de error en torno al 10 %. Por último, el Heptano que en puntos de baja temperatura parte con un error sobre el 10 %, desciende hasta el 2 % conforme aumenta la temperatura, hecho que puede deberse a una evolución diferente al resto de fluidos de la viscosidad conforme aumenta la temperatura, por ello el error no se mantiene constante a lo largo del rango de temperaturas.

5.4. CONCLUSIONES

Finalmente, habiendo analizado los resultados, se llega a las siguientes conclusiones:

- En primer lugar, se confirma que la hipótesis de que el Hexadecano tiene unas propiedades muy diferentes a las del resto de combustibles ensayados, presumiblemente a causa del mayor número de cadenas de hidrocarburos que contiene en comparación al resto de fluidos, por ello es una sustancia que no deberá formar parte de la calibración para este tipo de sustancias. Y en consecuencia no se

podrían caracterizar sustancias multicomponente con características similares al Hexadecano.

- Por otra parte, la constante de calibración presenta una dispersión mayor a lo esperado, como se observa en la figura 5.1, lo cual puede verse causado por la diferencia las propiedades de los distintos fluidos, añadido a que, con los medios disponibles, no se puede confirmar que no existan impurezas a nivel microscópico en el interior del tubo que afecten al desarrollo de la capa límite y por tanto a las medidas.
- Una conclusión que debe ser destacada, es que este aparato no resulta apropiado para determinar la viscosidad de cualquier tipo de sustancia. Solamente se pueden extraer resultados preciso en los casos que se caracterice un combustible con propiedades similares al fluido de calibración, es decir, combustibles cuyas viscosidades esten situadas en un orden de magnitud similar.
- En el ámbito personal ha sido una gran oportunidad para la familiarización con el uso de las diferentes herramientas y equipos del laboratorio, así como con el funcionamiento interno de un departamento de investigación. Por otro lado, ha resultado una experiencia útil para iniciar y expandir los conocimientos sobre diferentes herramientas informáticas como Solidworks, Latex, Matlab y Arduino.

5.5. PROPUESTAS PARA EL FUTURO

Por último, con la realización práctica del trabajo finalizada, no se han dejado de buscar ideas para la evolución y mejora del viscosímetro en el futuro:

- Una posible mejora reside en un cambio del sistema de adquisición de datos, en el que en vez de utilizar sensores binarios, se pueden utilizar varias bobinas que, envolviendo el tubo, nos permiten detectar la caída del cuerpo gracias a la inducción electromagnética que se genera por el desplazamiento de un imán a través de estas bobinas. Este cambio significaría un cambio sustancial en la forma de obtener los datos del viscosímetro, dejando de lado un sistema que envía un cero o un uno como respuesta para obtener una señal continua que representaría el movimiento del cuerpo a través del tubo. Con esta solución se formaría un sistema de adquisición de datos más robusto y sería necesario un nuevo procedimiento de filtrado y postprocesado de dicha señal.
- Otra opción viable para mejorar el viscosímetro sería un nuevo tubo interior que, mediante algún procedimiento específico, garantice una menor rugosidad en su interior.

- Por otro lado, se podría mecanizar un nuevo tubo exterior, debido a que el actual se magnetizó cuando fue mecanizado y, pese a haber recibido un tratamiento térmico para ser desmagnetizado, es posible que todavía hoy exista magnetismo en el tubo que atraiga al cuerpo de caída hacia la pared y provoque que la capa límite no evolucione igual en todos los lados del cuerpo.
- Otra idea, la cual ha sido diseñada y ya está en disposición de ser realizada, sería calibrar el dispositivo a alta presión, de modo que obteniendo una mayor cantidad de puntos para construir la recta, o mapa, de calibración, este se ajuste más al comportamiento real de los combustibles.
- Como última opción, o incluso como conclusión, aparece la idea de utilizar el viscosímetro para caracterizar combustibles mediante fluidos de características similares, como pueda ser caracterizar Gasolina a partir del Octano como fluido de calibración, cuyas viscosidades tienen el mismo orden de magnitud y un comportamiento similar.

Bibliografía

- [1] F. BARBADILLO. Formación inyección TDI. Último acceso 11 de Marzo de 2018. Disponible en internet: <http://www.fbelectronica.com/Formacion-1/Curso-TDI.htm>
- [2] T. QUISANT. Sistema de inyección common rail promcytec. Último acceso 12 de Marzo de 2018. Disponible en internet: <https://es.slideshare.net/tquisant/sistema-de-inyecin-common-rail-promcytec>
- [3] PROF. F. PAYRI, PROF. J. M. DESANTES: *Motores de combustión interna alternativos*, Universidad Politécnica de Valencia Editorial y Editorial Reverté, Valencia 2017.
- [4] F. WHITE. *Fluid Mechanics*, Mcgraw-hill Series in Mechanical Engineering, España 2008.
- [5] J. GARCÍA QUESADA. Tema 2 Fluidos viscosos. Último acceso 22 de Mayo de 2018. Disponible en internet: <http://rua.ua.es/dspace/handle/10045/3623>
- [6] I. E. IDEL'CIK: *Mémento des pertes de charges*, Direction des études et recherches d'Electricité de France (EDF), Francia 1986.
- [7] LEFEBVRE, A., MCDONELL, V: *Atomization and Sprays, Second Edition.*, Boca Raton: CRC Press, Francia 2017.
- [8] K. MAHESH. Computational Flow Physics Laboratory: Sourabh Apte Research Group. Último acceso 21 de Junio de 2018. Disponible en internet: <http://web.engr.oregonstate.edu/~sva/sprays.html>
- [9] R.D. REITZ, F.V. BRACCO. *Mechanism of atomization of a liquid jet. Physics of Fluids*. University of Wisconsin, Estados Unidos 1982.
- [10] E. GÓMEZ, J. ANDAVERDE, E. SANTOYO, G. URQUIZA. Determinación de la viscosidad y su incertidumbre en fluidos de perforación usados en la construcción de pozos geotérmicos. Último acceso 20 de Diciembre de 2018. Disponible en internet: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1026-87742009000200018

- [11] R. .FOX, A. MCDONALD *Introducción a la Mecánica de Fluidos*. Ed. McGraw Hill, España 1995.
- [12] F. SALVADOR. *An investigation on the dynamic behaviour at different temperatures of a solenoid operated common-rail ballistic injector by means of a one dimensional model* Universitat Politècnica de València, España 2014.
- [13] C.VALVERDE. Viscosímetro de tubo capilar. Último acceso 28 de Mayo de 2018. Disponible en internet: <https://www.slideshare.net/carlosvalverde24/viscosmetro-de-tubo-capilar>
- [14] J.FERNANDEZ. Curso de vapor. Medida de caudal de vapor en instalaciones industriales. Último acceso 28 de Mayo de 2018. Disponible en internet: <http://www.monografias.com/trabajos106/curso-vapor-medida-caudal-vapor-instalaciones-industriales/curso-vapor-medida-caudal-vapor-instalaciones-industriales.shtml>
- [15] CÉSAR. Instrumentos de laboratorio: Viscosímetro. Último acceso 30 de Mayo de 2018. Disponible en internet: <http://instrumentosdelaboratorio.org/viscosimetro>
- [16] J.A. HERVÁS. Método de ensayo - Determinación de la viscosidad. Método Hoppler. Último acceso 30 de Mayo de 2018. Disponible en internet: http://www.matematicasyoesia.com.es/metodos/melweb08_Hoppler.htm
- [17] C. DINDAR, E.KIRAN : *Reliable method for determination of the velocity of a sinker in a high-pressure falling body type viscometer*, Review of Scientific Instruments, Reino Unido 2002.
- [18] E.KIRAN : *A new experimental system to study the temperature and pressure dependence of viscosity, density, and phase behavior of pure fluids and solutions*, The Journal of Supercritical Fluids, Elsevier, Estados Unidos 1990.
- [19] J. GARCÍA QUESADA: Tema 5 Técnicas Reométricas. Último acceso 30 de Mayo de 2018. Disponible en internet: <http://rua.ua.es/dspace/handle/10045/3626>
- [20] A. FRANCO GARCÍA: Fuerza de rozamiento. Coeficiente de arrastre. Último acceso 5 de Junio de 2018. Disponible en internet: <http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica3/fluidos/reynolds/reynolds.html>
- [21] I. CEBREIRO PASCUAL: *Diseño y puesta a punto de una herramienta experimental para la determinación de la viscosidad*, Trabajo Fin de Grado, ETSID, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia 2014.
- [22] SUPERMAGNETE:Página web. Último acceso 7 de Junio de 2018. Disponible en internet: <https://www.supermagnete.es/barras-magneticas-neodimio>

-
- [23] C. DERAÏN: *Application d'une méthodologie expérimentale pour déterminer la viscosité des carburants diesels dans des conditions de pressions élevées*, Trabajo Fin de Grado, ETSID, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia 2017.
- [24] J.J. FIGUEROA: *Aplicación de una metodología experimental para la determinación de la viscosidad de combustibles diésel en función de la temperatura.*, Trabajo Fin de Grado, ETSID, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia 2018.
- [25] METAVAL ABELLA: Página web. Último acceso 17 de Noviembre 2018. Disponible en internet: <http://metavalabella.com/>
- [26] JULABO: Página web. MA-4 Baño Termostático. Último acceso 18 de Octubre 2018. Disponible en internet: <https://www.julabo.com/es/productos/termostatos-de-circulacion/banos-termostaticos/ma-4-bano-termostatico>
- [27] M. JIMENEZ: *Diseño de un viscosímetro de caída de cuerpo para altas presiones y altas temperaturas.*, Trabajo Fin de Grado, ETSID, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia 2013.
- [28] REPSOL: *Ficha técnica: LUBRICANTE INDUSTRIAL Electra 3*. Disponible en internet: https://www.repsol.com/imagenes/es_es/RP_ELECTRA_3_tcm7-283950.pdf
- [29] COMUS: Página web. PSC 175/30 Magnetic Proximity Switches Comus Group. Último acceso 29 de Octubre de 2018. Disponible en internet: <https://www.comus-intl.com/products/proximity-sensors/psc-17530/>
- [30] LASERTALL: Página web. Último acceso 24 de Noviembre de 2017. Disponible en internet: <http://www.lasertall.com/>
- [31] PCCOMPONENTES: Página web. Placa de Conexiones 830 Contactos. Último acceso 29 de Octubre de 2018. Disponible en internet: <https://www.pccomponentes.com/placa-de-conexiones-830-contactos>
- [32] ARDUINO: Página web. Arduino Leonardo with Headers. Último acceso 29 de Octubre de 2018. Disponible en internet: <https://store.arduino.cc/arduino-leonardo-with-headers>
- [33] TRELLEBORG: *Catálogo juntas estáticas*. Madrid, 2007. Disponible en internet: http://tss-static.com/remotemedia/media/globalformastercontent/downloadsautomaticallycreatedbyscript/catalogs/static_es.pdf
- [34] WIKI: Página web. WIKI Gama de productos estándar. Último acceso 2 de Noviembre de 2018. Disponible en internet: www.wika.es.

- [35] NOVASWISS: Página web. Último acceso 28 de Octubre de 2018. Disponible en internet: <https://www.novaswiss.com/en/start-page.html>
- [36] National Institute of Standards and Technology | NIST: Página web. Disponible en internet: <https://www.nist.gov/>
- [37] J. Dymond, K. Young, J. Isdale: *Transport properties of nonelectrolyte liquid mixtures. Viscosity coefficients for the n-hexane and n-hexadecane system at temperatures from 25 to 100°C at pressures up to the freezing pressure or 500MPa*, Int. J. Thermophys, Inglaterra 1980.
- [38] C.J. Schaschke, S. Abid, I. Fletcher, M.J. Heslop: *Evaluation of a falling sinker-type viscometer at high pressure using edible oil*, Department of Chemical and Process Engineering, University of Strathclyde, Inglaterra 2008.

Documento II

PRESUPUESTO

Índice de documento

1 Introducción

1.1. Introducción	79
1.2. Metodología de cálculo del presupuesto	79
1.2.1. Coste De La Mano De Obra	79
1.2.2. Coste De Los Equipos	80
1.2.3. Coste Del Material Adquirido	80
1.2.4. Coste Del Material Fungible	80
1.3. Justificación de los costes	80
1.3.1. Coste De La Mano De Obra	81
1.3.2. Coste De Los Equipos	82
1.3.3. Coste Del Material Adquirido	82
1.3.4. Coste Del Material Fungible	82
1.4. Coste total	84

Capítulo 1

Introducción

1.1. INTRODUCCIÓN

En esta parte del documento se manifiesta el coste total de la consecución del proyecto. La cual se va abordar, por una parte, explicando la metodología de cálculo del presupuesto, la cual será aplicada más adelante en el cálculo de cuatro presupuestos parciales, en función de que formen parte del coste de la mano de obra, de los equipos, del material adquirido para la realización del proyecto o del material fungible.

1.2. METODOLOGÍA DE CÁLCULO DEL PRESUPUESTO

En primer lugar, utilizando en todo momento la unidad monetaria euro (€), se realizará el cálculo, por separado, de cada uno de los presupuestos parciales.

Una vez calculados los presupuestos parciales, se procede a calcular el presupuesto total que resulta de la suma de todos los presupuestos parciales, añadiendo también el concepto de gastos imprevistos, el cual supone un 10 % del presupuesto total. Y por último se añadió el impuesto sobre el valor añadido (IVA).

A continuación se procede a explicar la procedencia del gasto de cada uno de los presupuestos parciales.

1.2.1. Coste De La Mano De Obra

En este presupuesto parcial se tendrá en cuenta el salario de todo el personal implicado en el desarrollo del proyecto. Cada uno de los diferentes miembros que participan tendrán diferentes retribuciones según su función y jerarquía dentro del proyecto.

Para el cálculo del salario por hora de cada uno de los miembros se recurre a las tablas PAS y PDI que proporciona la Universidad Politécnica de Valencia, ya que conociendo el número de horas invertidas, resulta un cálculo sencillo.

1.2.2. Coste De Los Equipos

Esta parte contempla el uso del ordenador por parte del usuario, ya que es el único equipo amortizable utilizado en este proyecto. Por lo que se debe calcular tanto la amortización y mantenimiento del equipo.

Para calcular la amortización se utiliza la ecuación 1.1, que supone una depreciación lineal a lo largo de la vida del producto:

$$a = \frac{V_c - V_r}{n} \quad (1.1)$$

Donde:

- a : Es el coste de amortización del producto. [€/año]
- V_c : Es el valor de compra del equipo. [€]
- V_r : Es el valor de residual del equipo, el cual se estima un 20 % de V_c . [€]
- n : Es el período de amortización del equipo. [años]

Y después es conveniente añadir el coste de las licencias de los programas informáticos utilizados en este proyecto.

1.2.3. Coste Del Material Adquirido

En este presupuesto parcial se incluyen los elementos no amortizables que se han adquirido para la realización del proyecto, en este apartado se tienen en cuenta las unidades adquiridas y el precio de compra.

Por otra parte, cabe destacar que no se consideran los costes de los sistemas y componentes propios de la sala que están disponibles en el laboratorio de inyección como el abastecimiento de agua y electricidad.

1.2.4. Coste Del Material Fungible

En este subapartado se aborda el gasto que supone la utilización de material fungible, es decir, la electricidad consumida por la iluminación de la sala, por el termorre regulador y por el ordenador durante la realización del proyecto. Realizando el cálculo en función de un precio establecido del kWh.

1.3. JUSTIFICACIÓN DE LOS COSTES

En este apartado se procede a desglosar y calcular los costes asociados los objetos, acciones y trabajadores que se han mencionado en el apartado anterior.

1.3.1. Coste De La Mano De Obra

En primer lugar, para calcular el coste de la mano de obra, se debe establecer el coste horario de cada uno de los miembros que participen en el proyecto, lo cual se obtiene a partir de la retribución anual y de las horas laborables que tiene un año, como puede observarse en la tabla de la figura 1.1.

Descripción	Retr. Anual [€]	Horas laborables	Salario [€/h]
Estudiante de grado	0.00	400	0.00
Profesor ayudante doctor	25,128.43	1792	14.02
Técnico de laboratorio	24,299.52	1792	13.56
Tornero	24,299.52	1792	13.56

Figura 1.1: Coste horario de los implicados en el proyecto.

- Estudiante de grado, coste horario 0 €/h.
- Profesor ayudante doctor, coste horario 14.02 €/h.
- Técnico de laboratorio del grupo A-2, coste horario 13,56 €/h.
- Tornero, coste horario 13,56 €/h.

Por otra parte para determinar el número de horas anuales que deben cumplir los trabajadores, se debe multiplicar las 8 horas diarias que dura una jornada laboral por el número de días laborables que tiene un año, habiendo restado el periodo vacacional de agosto.

Una vez conocidas la tasa horaria y el número de horas invertidas en el proyecto por cada uno de los implicados se calcula el coste.

Descripción	Salario [€/h]	Horas dedicadas	Importe [€]
Estudiante de grado	0.00	400	0.00
Profesor ayudante doctor	14.02	40	560.90
Técnico de laboratorio	13.56	35	474.60
Tornero	13.56	15	203.40

Figura 1.2: Coste de la mano de obra del proyecto

Sumando la remuneración de cada uno de los trabajadores, que se observa en la tabla que se observa en la figura 1.2, se obtiene el importe total, el cual asciende a 1238.90 €.

1.3.2. Coste De Los Equipos

En este presupuesto parcial, que tiene en cuenta el coste de amortización de los equipos, se calcula en primer lugar la amortización anual del aparato, como se observa en la tabla de la figura 1.3.

Aparato	Vc [€]	Vr [€]	n [años]	a [€/año]
Ordenador	850	170	5	136
Placa arduino	20	4	8	2
Bomba Nova Swiss	4292.31	858.46	8	429.23
Julabo MA-4	4200	840	8	420

Figura 1.3: Cálculo de la amortización del equipo

Una vez realizado este cálculo y asumiendo que el periodo de realización del proyecto es de 1 año, se realiza la suma del valor de los equipos y de las licencias informáticas necesarias.

Cocepto	Precio [€/año]
Licencia MATLAB® (investigación CMT)	1523
Licencia Microsoft® Office™	115
Amortización equipos	987.23
TOTAL:	2625.23

Figura 1.4: Coste del equipo y de las licencias utilizadas en el proyecto

Como se observa en la tabla de la figura 1.4, este presupuesto parcial asciende a 2625.23 €.

1.3.3. Coste Del Material Adquirido

Para el cálculo de esta parte del presupuesto, que corresponde a todo el material adquirido expresamente para al realización del proyecto, es necesario enumerar todos los elementos adquiridos, y la cantidad comprada de cada uno de ellos. Para así a partir del precio por unidad de cada elemento conocer el coste total.

Como se observa en la tabla 1.5, el coste del material adquirido para este proyecto asciende a 5086.90 €.

1.3.4. Coste Del Material Fungible

Como último subapartado del presupuesto aparece el coste del material fungible, para el cual hay que tener en cuenta los días de utilización de cada equipo que consuma electricidad. En este caso, los 18 tubos fluorescentes que han estado en funcionamiento

Descripción	Unidades	Cantidad	Preco [€/Ud.]	Importe [€]
Tubo interior	m.	1.00	35.00	35.00
Junta MOV	Ud.	31.00	15.87	491.97
Junta Tórica	Ud.	40.00	1.98	79.20
Sinker 9.4 mm	Ud.	3.00	38.00	114.00
Sinker 9.6 mm	Ud.	3.00	38.00	114.00
Sinker 9.8 mm	Ud.	3.00	38.00	114.00
Imanes 8x20 mm	Ud.	20.00	8.83	176.60
Tubo exterior	Ud.	1.00	1305.00	1305.00
Tapa tubo exterior	Ud.	2.00	190.00	380.00
Sensores magnéticos	Ud.	10.00	6.70	67.00
Placa sujeción sensores	Ud.	1.00	36.00	36.00
Bidón Electra 208l	Ud.	1.00	504.60	504.60
Tubo de metacrilato	Ud.	1.00	26.00	26.00
Tornillos 8x70	Ud.	30.00	0.30	9.00
Tornillos 3x8	Ud.	30.00	0.10	3.00
Tuercas 3	Ud.	30.00	0.10	3.00
Soporte PVC	m.	0.14	130.00	18.20
Resistencias 5K	Ud.	15.00	0.15	2.25
Indicador LED	Ud.	1.00	198.38	198.38
Línea de alta presión	m.	1.00	17.43	17.43
Trans. WIKA HP2-4000	Ud.	1.00	1127.64	1127.64
Placa de conexiones	Ud.	1.00	8.00	8.00
Bidón Heptano 25l	Ud.	1.00	111.97	111.97
Frasco Octano 1 L	Ud.	1.00	16.43	16.43
Frasco Decano 25 L	Ud.	1.00	34.25	34.25
Bidón Dodecano 25 L	Ud.	1.00	35.74	35.74
Frasco Hexadecano 1 L	Ud.	1.00	58.24	58.24
			COSTE TOTAL [€] :	5086.90

Figura 1.5: Costes de los componentes y materiales comprados para la realización del proyecto

los 16 días de trabajo de laboratorio, los 12 días de ensayos de trabajo con el ordenador y por último los 6 días de ensayos en los que se ha utilizado el termorregulador.

Descripción	Ud.	kW/Ud	Días	Horas/Día	Coste [€]
Iluminación	18	0.04	16	8	13.824
Ordenador	1	0.09	12	8	1.296
Termorregulador	1	7	6	8	50.4
				Coste total [€]	65.52

Figura 1.6: Coste del material fungible

Como se observa en la tabla de figura 1.6, este último presupuesto parcial asciende a 65.52 €.

1.4. COSTE TOTAL

El presupuesto total, que se presenta en la tabla de la figura 1.7, se calcula sumando todos los presupuestos parciales que se han calculado anteriormente, subtotal al cual se le añade en primer lugar un 10% en concepto de imprevistos y por último el 21% de IVA.

		IMPORTE [€]
Coste de la mano de obra		1238.90
Coste de los equipos		2625.23
Coste del Material		5086.90
Coste del Material Fungible		65.52
	SUBTOTAL	9016.55
Imprevistos (10%)		901.66
	TOTAL NETO	9918.21
IVA (21%)		2082.82
	TOTAL	12001.03

Figura 1.7: Coste total del proyecto.

El **presupuesto total** del proyecto asciende a la cantidad de **Doce mil un con tres**.