



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

# **CARACTERIZACIÓN DE ACEITES HIDRÁULICOS Y LÍQUIDOS REFRIGERANTES EN MÁQUINAS DE INYECCIÓN DE PLÁSTICO PARA EL DISEÑO DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO**

*Trabajo de Fin de Grado  
Grado en Ingeniería Mecánica*

**Autor:** Jorge Castelló Villanueva

**Tutor:** José Miguel Salavert Fernández

**Cotutor:** Bernardo Tormos Martínez

Valencia, julio de 2018

*A toda mi familia, en especial  
a mis padres, a quienes se lo  
debo todo y siempre han  
confiado en mí.*

*Por supuesto a Inma, esto ha  
sido posible gracias a ti.*

# Resumen

Las máquinas de inyección de plástico son equipos que requieren de un sistema hidráulico y un sistema de refrigeración específico para su correcto funcionamiento. Con el paso de los años, las formulaciones de los aceites hidráulicos y líquidos refrigerantes han sido desarrolladas con el propósito de buscar mejores propiedades y comportamientos dentro del ámbito que les incumbe para mejorar el funcionamiento de dichos sistemas. Los fluidos se van degradando a medida que son utilizados lo cual afecta a la fiabilidad de los sistemas. Una forma de evitar futuros daños derivados de la disminución del correcto comportamiento de los fluidos es la puesta en marcha de un plan de mantenimiento predictivo que asegure que los fluidos mencionados mantengan sus propiedades, cumplan su objetivo en el funcionamiento global de la máquina y, de esta manera, prolongar su vida útil con un máximo rendimiento.

Para analizar el estado de los diferentes fluidos se emplean diversas técnicas analíticas para poder establecer la causa que provocan los síntomas que los fluidos presentan. Teniendo en cuenta esto, se relacionan los síntomas presentados en los fluidos con el estado de la máquina de dónde proceden. Gracias a las deducciones derivadas del estudio, se diseña un plan de mantenimiento el cual atiende a los parámetros seleccionados como importantes para el monitorizado del estado de las máquinas mediante el estudio del aceite lubricante y del refrigerante.

# Summary

Plastic injection machines are equipments which require a hydraulic system and a specific cooling system for them to work properly and perform to its highest capability. For years, performance only was regarded as the main aspect to improve in these oils and cooling liquids. Those improvements were planned to provide better properties and machinery performance within their own working fields. Fluids decay as they're used, and this affects the liability of our systems. Setting up a system of forecasted maintenance could be the way to prevent future damage derived from underperformance. It can reassure that the forementioned fluids keep their properties, accomplish their targets within the machine's global performance, and so, broadening the lifespan of our industrial machinery with a top performance.

A number of techniques are involved in analysing the state of the fluids and are able to establish the cause for these symptoms to appear. Taking all that into consideration, symptoms revealed by the machine's malfunction is also related to the maintenance we keep in our machines. Thanks to what's been found in the case-study a performance plan is put in motion. A maintenance plan is designed within the parameters chosen to be important and monitoring the machinery well-being by using oil and cooling fluid for our study.

# Resum

Les màquines d'injecció de plàstic són equips que requereixen d'un sistema hidràulic y un sistema de refrigeració específic per al seu correcte funcionament. Amb els pas dels anys, les formulacions dels olis hidràulics y líquids refrigerants han sigut desenvolupades amb el propòsit de buscar millors propietats y comportaments dins de l'àmbit que les incumbeix per millorar el funcionament d'aquests sistemes. Els fluids es degrades a mesura que s'utilitzen, la qual cosa afecta a la fiabilitat dels sistemes. Una forma d'evitar futurs danys derivats de la disminució del correcte comportament dels fluids es mitjançant l'aplicació d'un pla de manteniments predictiu que garantisca que els fluids mencionats mantinguen les seves propietats, complisquen el seu objectiu en el funcionament global de la màquina i, d'esta manera, prolongar la seua vida útil amb un màxim rendiment.

Per analitzar el estat dels diferents fluids s'empren diverses tèquines analítiques per poder establir la causa que provoquen els símptomes que els fluids presenten. Considerant aquest fet, es relacionen els símptomes presentats en els fluids amb el estat de la màquina d'on procedeixen. Gràcies a les deduccions derivades del estudi, es dissenya un pla de manteniment el qual atén als paràmetres seleccionats com importants per al monitoritzat del estat de les màquines mitjançant el estudi del oli hidràulic i del refrigerant.

# ÍNDICE

<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	6
1.1. Antecedentes .....	6
1.2. Objetivos .....	6
<b>2. MÁQUINAS DE INYECCIÓN DE PLÁSTICO</b> .....	7
2.1. Máquinas de inyección .....	7
2.1.1. Máquinas de pistón.....	7
2.1.2. Máquinas de husillo.....	8
2.2. Proceso de inyección .....	9
2.3. Sistema hidráulico .....	12
2.4. Sistema refrigerante .....	13
<b>3. ACEITES HIDRÁULICOS INDUSTRIALES</b> .....	14
3.1. Introducción.....	14
3.2. Equipos de bombeo .....	14
3.3. Aceites de motor .....	15
3.4. Aceites hidráulicos más comunes .....	16
3.5. Aditivos .....	16
3.6. Filtrado .....	17
3.7. Problemas habituales y soluciones .....	18
<b>4. LÍQUIDOS REFRIGERANTES</b> .....	19
4.1. Temperatura del refrigerante .....	19
4.2. Consumo del refrigerante .....	19
4.3. Presión del circuito de refrigeración.....	20
4.4. Estado del refrigerante.....	20
<b>5. TÉCNICAS ANALÍTICAS</b> .....	21
5.1. Valoración termométrica.....	21
5.2. Constante dieléctrica .....	22
5.3. Contaje de partículas .....	24
5.4. Contenido en agua .....	26
5.5. Densidad .....	27
5.6. Espectrometría infrarroja .....	28
5.7. Espectroscopia ICP-OES .....	31

5.8.	Medida del pH .....	35
5.9.	Refractometría .....	37
5.10.	Viscosidad cinemática .....	38
5.11.	Voltamperometría lineal de barrido .....	40
<b>6.</b>	<b>RESULTADOS DE LOS ACEITES HIDRÁULICOS .....</b>	<b>42</b>
6.1.	Nomenclatura .....	42
6.2.	Constante dieléctrica .....	43
6.3.	Viscosidad cinemática .....	44
6.4.	Densidad .....	45
6.5.	Valoración termométrica .....	46
6.6.	Contenido en agua .....	46
6.7.	Espectrometría infrarroja .....	47
6.8.	RULER .....	50
6.9.	Contaje de partículas .....	50
6.10.	ICP-OES.....	51
<b>7.</b>	<b>RESULTADOS DE LOS LÍQUIDOS REFRIGERANTES .....</b>	<b>55</b>
7.1.	Nomenclatura.....	55
7.2.	Densidad .....	57
7.3.	Medida del pH .....	61
7.4.	Refractometría .....	62
7.5.	Espectrometría infrarroja .....	64
<b>8.</b>	<b>PLAN DE MANTENIMIENTO .....</b>	<b>70</b>
<b>9.</b>	<b>CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS .....</b>	<b>71</b>
9.1.	Conclusiones .....	71
9.2.	Trabajos futuros .....	72
<b>10.</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>73</b>

# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema de una máquina de inyección de plástico de pistón [1].....	7
Figura 2 – Esquema de una máquina de inyección de plástico de husillo [2] .....	9
Figura 3 - Tiempos característicos de un ciclo de inyección de plástico.....	10
Figura 4 - Esquema de un molde de una máquina de inyección de plástico [4] .....	12
Figura 5 - Esquema del sistema hidráulico de una máquina de inyección de plástico [6] .....	12
Figura 6 - Valoración termométrica mediante el equipo de Methrom .....	21
Figura 7 - Oil check monitoring TMEH 1 de SKF.....	23
Figura 8 - Contador de partículas con sensor Oilwear S100 de Atten2 Advanced Monitoring Technologies.....	26
Figura 9 - Picnómetro capilar con termómetro .....	27
Figura 10 - FT-IR de A2 Technologies de la serie 5500t .....	30
Figura 11 - ICP-OES de Thermo Scientific, modelo iCAP 7400 con configuración radial .....	33
Figura 12 - Cámara de nebulización ciclónica de doble paso .....	34
Figura 13 - pH Meter Basic 20 de Crison .....	36
Figura 14 - Electrodo 50 11 de Crison .....	37
Figura 15 - Refractómetro de mano con escala BRIX .....	38
Figura 16 - Baño termostático con control de temperatura digital.....	39
Figura 17 - Viscosímetro capilar Ostwald (izq.), Cannon-Fenske (centro), Ubbelohde (der.).....	40
Figura 18 - RULER Antioxidant Monitoring de Fluitec .....	41
Figura 19 - Espectro infrarrojo aceite H0.....	49
Figura 20 - Espectro infrarrojo de los aceites H03, H05 y H08.....	49
Figura 21 - Índice RUL en los aceites H0, H03, H05 y H08.....	53
Figura 22 - Aditivo ZDDP medido por FT-IR en aceites H0, H03, H05 y H08.....	54
Figura 23 - Zinc y Fósforo (en ppm) en aceites H0, H03, H05 y H08 .....	54
Figura 24 - Densidad teórica (en g/cm <sup>3</sup> ) frente a concentración de etilenglicol (en %m/m) de los patrones .....	59
Figura 25 - Densidad experimental (en g/cm <sup>3</sup> ) frente a concentración de etilenglicol (en %m/m) de los patrones .....	59
Figura 26 - Grados Brix frente a concentración (en %m/m) de los patrones .....	63
Figura 27 - Espectro infrarrojo de los patrones .....	65
Figura 28 - Espectro infrarrojo ampliado entre 2800 y 1800 cm <sup>-1</sup> .....	66

Figura 29 - Transmitancia frente a número de onda (en $\text{cm}^{-1}$ ) del agua .....	66
Figura 30 - Transmitancia frente a número de onda (en $\text{cm}^{-1}$ ) del etilenglicol .....	67
Figura 31 - Absorbancia frente a concentración de agua (en %m/m) en los patrones.	67
Figura 32 - Absorbancia frente a concentración de etilenglicol (en %m/m) en los patrones.....	68

# ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 – Tabla de desviaciones en función de los diferentes parámetros.....	23
Tabla 2 - Código ISO en función de la cantidad de partículas por mililitro.....	25
Tabla 3 - Longitud de onda (nm), rango (ppm), limite de detección (ppm) para la tecnología ICP-OES.....	33
Tabla 4 - Nomenclatura de los aceites hidráulicos .....	42
Tabla 5 - Ficha de seguridad del aceite Galp Hidrolep 46.....	43
Tabla 6 - Constante dieléctrica por los métodos HI y LOW .....	43
Tabla 7 - Viscosidad cinemática a 40 y 100 °C (en mm <sup>2</sup> /s) e Índice de viscosidad.....	44
Tabla 8 - Densidad a 15 °C (en kg/m <sup>3</sup> ) .....	45
Tabla 9 - TAN y TBN (en mg KOH/g).....	46
Tabla 10 - Contenido en agua (en %V/V).....	47
Tabla 11 - Resultados de espectrometría infrarroja para aceites hidráulicos .....	48
Tabla 12 - Índice RUL (en %).....	50
Tabla 13 - Código de limpieza ISO 4406.....	51
Tabla 14 - Resultados espectrometría ICP-OES para aceites hidráulicos.....	52
Tabla 15 - Nomenclatura de los líquidos refrigerantes .....	55
Tabla 16 - Ficha de seguridad líquido refrigerante Winner Lubricantes de alta calidad concentrado.....	56
Tabla 17 - Temperatura de congelación en función de la concentración de anticongelante .....	56
Tabla 18 - Concentración de agua y etilenglicol (en %m/m) de los patrones .....	57
Tabla 19 - Densidad teórica y experimental (en g/cm <sup>3</sup> ) de los patrones.....	58
Tabla 20 - Concentración de etilenglicol teórica y experimental (en %m/m) de las muestras de líquidos refrigerantes.....	60
Tabla 21 - Valor del pH de las muestras de líquidos refrigerantes .....	61
Tabla 22 - Refractometría (en °Brix) de los patrones. Los marcados mediante <sup>(a)</sup> , son los patrones analizados mediante el refractómetro de rango 0-32°Brix, mientras que los valores marcados con <sup>(b)</sup> son los analizados con el refractómetro de rango 28-62 °Brix.....	62
Tabla 23 - Grados Brix y concentración (en %m/m) de las muestras de líquidos refrigerantes .....	64
Tabla 24 - Concentración de agua (en %m/m) de las muestras de los líquidos refrigerantes (n.d.: no detectable) .....	69

# 1.INTRODUCCIÓN

## 1.1. Antecedentes

La línea de Mantenimiento del grupo CMT-Motores Térmicos del Departamento de Máquinas y Motores Térmicos de la Universidad Politécnica de Valencia realiza investigaciones en el campo de los aceites lubricantes. El departamento tiene importantes convenios y colaboraciones con empresas como Repsol o EMT de Valencia.

Los temas más estudiados en este departamento están focalizados en el estudio de los aceites lubricantes de motor, aunque también poseen competencias para la caracterización de combustibles, así como de otros fluidos relacionados.

Con este trabajo se busca ampliar la ventana de capacidades de la línea, incorporando otros nuevos objetos de estudio: los aceites hidráulicos industriales y los líquidos refrigerantes de las máquinas de inyección de plástico.

## 1.2. Objetivos

Los objetivos generales del presente proyecto se encuentran estructurados en dos grupos:

- Realizar una ruta analítica especial para aceites hidráulicos y líquidos refrigerantes en uso en máquinas de inyección de plástico.
- A partir de los resultados obtenidos en el primer punto, determinar los parámetros clave a monitorizar y diseñar un plan de mantenimiento específico para las máquinas de inyección de plástico.

Debido a que el laboratorio de combustibles y aceites lubricantes del CMT – Motores Térmicos tiene una dilatada experiencia a la hora de tratar con muestras de aceite lubricante procedente de motores de combustión, se debe realizar un plan de análisis especialmente diseñado para: los aceites hidráulicos y los líquidos refrigerantes.

Tras ello, se diseña un plan de mantenimiento predictivo específico utilizando las muestras de los sistemas hidráulicos y refrigerantes de las máquinas de inyección de plástico estudiadas.

## 2. MÁQUINAS DE INYECCIÓN DE PLÁSTICO

El moldeo por inyección consiste en la fundición de un material plástico que es introducido en las cavidades de un molde gracias a una presión ejercida. Tras ello, el plástico en su interior es enfriado dando lugar a una serie de piezas que pueden ser extraídas sin que se deformen.

### 2.1. Máquinas de inyección

#### 2.1.1. Máquinas de pistón

En las máquinas de pistón, la fusión del material plástico, suministrado a través de una tolva de alimentación, se realiza en una cámara cilíndrica de calefacción. Una vez que está fundido el material plástico, un pistón ejerce la presión necesaria para empujar el material fundido dentro de las cavidades del molde. Ambos procesos, fusión e inyección, se realizan en el mismo cilindro [1].

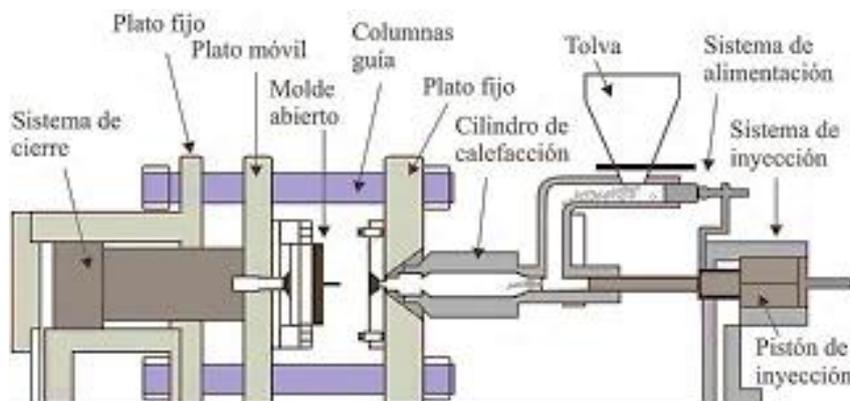


Figura 1 – Esquema de una máquina de inyección de plástico de pistón [1]

Las máquinas de pistón generalmente presentan un sistema de alimentación, un pistón de inyección, un cilindro de calefacción para conseguir fundir el material, un molde sobre el que se inyecta el material fundido, un cierre que mantiene las dos partes del molde unidas y unos controles para garantizar que el proceso funciona correctamente.

Este tipo de máquinas presentan, principalmente, cuatro inconvenientes o desventajas [1] que suelen ser de índole general:

- En primer lugar, se realiza una dosificación volumétrica de la granza, se alimenta a la máquina el volumen de material sólido que cae delante del pistón.
- En segundo lugar, la transmisión de calor en el cilindro de calefacción no es muy eficiente. Es muy difícil calentar los plásticos rápidamente y de una forma uniforme debido a su baja conductividad térmica, por lo que se le añade un torpedo dentro del cilindro para garantizar el calentamiento del material desde el interior del mismo.
- En tercer lugar, la unidad de inyección está constituida por el cilindro en el que se realiza el calentamiento del material. Para garantizar una correcta inyección se requiere que la presión sea suficientemente alta en las cavidades del moldeo y las pérdidas de presión sean lo menor posible.
- Por último, la velocidad de inyección está muy limitada debido al torpedo de calentamiento y al diseño de la cámara de calefacción.

### 2.1.2. *Máquinas de husillo*

Las máquinas de husillo son otro diseño de máquina caracterizada por calentar el material uniformemente y además de realizar un mezclado homogéneo. La rotación del tornillo transforma parte de la energía mecánica en calor mientras que las paredes del cilindro aumentan la temperatura por conducción, por lo tanto, la eficiencia en la transmisión de calor es más elevada que en las máquinas de pistón. El tornillo se mueve axialmente para realizar el proceso de inyección, lo cual facilita el calentamiento y la inyección. Debido a las ventajas que presentan este tipo de máquinas, son las más extendidas y utilizadas en la actualidad [1].

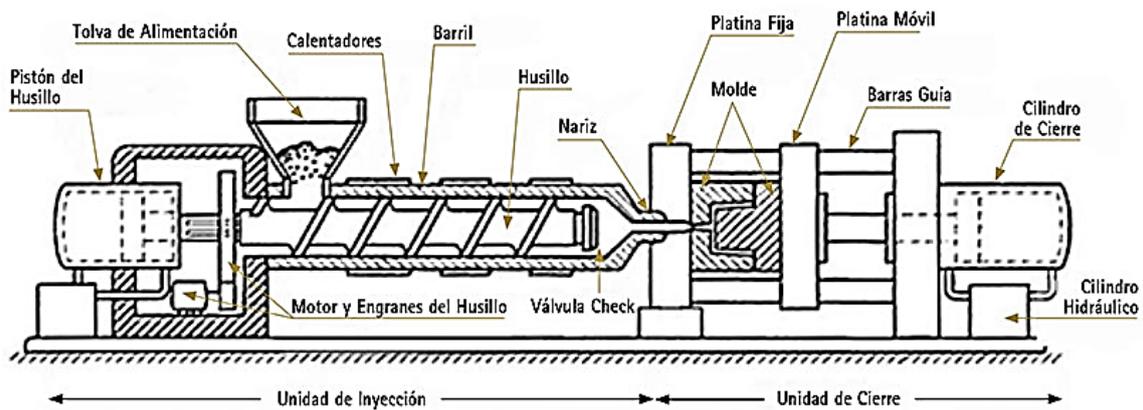


Figura 2 – Esquema de una máquina de inyección de plástico de husillo [2]

A medida que el tornillo va girando, la máquina va produciendo material fundido y lo va acumulando. Una vez existe cantidad suficiente de material fundido, el tornillo deja de girar y realiza un movimiento axial para la inyección del material fundido. Las máquinas de husillo presentan un detalle que se debe tener en cuenta, según el tipo de material que se quiere inyectar, se requiere ajustar el diseño de una serie de los elementos de la máquina: el paso de hélice, la profundidad del canal y la longitud del tornillo.

## 2.2. Proceso de inyección

El proceso de inyección se puede dividir en dos fases: la primera de ellas consiste en la fusión del material, mientras que la segunda de ellas consiste propiamente en la inyección del plástico fundido en el molde.

En primer lugar, el ciclo de inyección consta de una serie de tiempos definidos para poder fundir el material para su posterior inyección [3]:

- Tiempo de cierre del molde, requerido para cerrar el mismo.
- Tiempo de avance de la unidad de inyección, la unidad de inyección se sitúa mediante la boquilla en contacto con el bebedero.
- Tiempo de llenado, el pistón o el husillo avanzan y el molde se llena con el plástico.

- Tiempo de compactación, el molde permanece cerrado mientras que el plástico se enfría.
- Tiempo de retroceso de la unidad de inyección, una vez solidifica la entrada a la cavidad, comienza el movimiento rotatorio del husillo para plastificar el material de la siguiente etapa.
- Tiempo de enfriamiento, necesario para enfriar el polímero en el interior de las cavidades del molde. El enfriamiento del material comienza realmente cuando toca las paredes frías del molde y finaliza cuando se extrae la pieza.
- Tiempo de apertura del molde, durante el que éste se abre.
- Tiempo de extracción de la pieza, durante el que se sacan las piezas de las cavidades de moldeo.
- Tiempo con el molde abierto, desde que termina un ciclo hasta que empieza el siguiente.

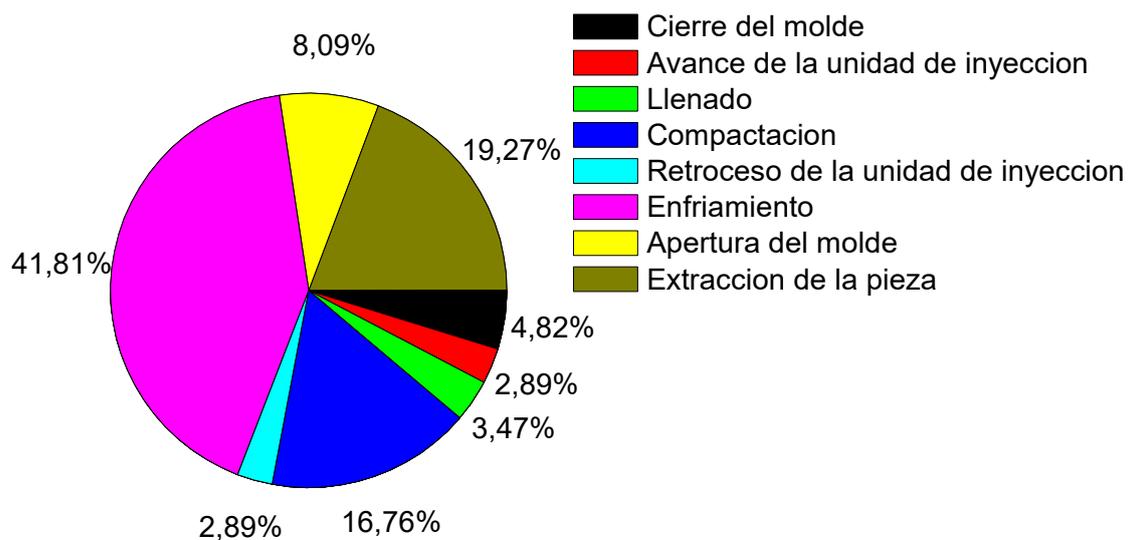


Figura 3 - Tiempos característicos de un ciclo de inyección de plástico

Cada una de las etapas anteriores queda definida por un tiempo el cual está condicionado por el material utilizado en la inyección.

En segundo lugar, las máquinas de inyección se pueden caracterizar mediante parámetros específicos: capacidad de inyección, capacidad de plastificación, presión de inyección, velocidad de inyección y fuerza de cierre. Todos estos parámetros deben ser considerados para la correcta selección del tipo de máquina de inyección.

- La capacidad de inyección es la cantidad máxima de material a una presión determinada que una máquina es capaz de inyectar en un molde de una sola vez. La unidad de inyección suele disponer de suficiente material para realizar dos inyecciones, con lo cual, menos del 50% de la capacidad de inyección debería vaciarse en cada ciclo. Además, la cantidad de material introducida debe comprenderse entre 20-80% de la capacidad del cilindro, así el material no se degrada ni se encuentra plastificado.
- La capacidad de plastificación es la cantidad máxima de material que la máquina puede plastificar por unidad de tiempo. Plastificar un polímero significa calentarlo lo suficiente para poder realizar su inyección a una temperatura adecuada.
- La presión de inyección es la presión medida en la cara delantera del husillo.
- La velocidad de inyección determina la rapidez con la que puede llenarse un molde. Es el caudal de material que sale en el proceso de inyección.
- La fuerza de cierre mantiene las dos mitades del molde unidas. La fuerza interna del molde puede ser muy grande y necesita ser contrarrestada por una fuerza de cierre superior. Actualmente, las fuerzas de cierre superan las 1000 toneladas.

En tercer lugar, las variables del proceso de inyección se pueden clasificar en temperatura, presión, tiempo y distancia. Estas variables no son independientes, por lo que la modificación de una de ellas repercutirá sobre las demás.

En cuarto lugar, las máquinas de inyección se pueden simplificar en dos grandes secciones o sistemas: la unidad de inyección y el sistema de cierre. Por un parte, la unidad de inyección está compuesta principalmente por las válvulas de no retorno y por la tobera. Por otra parte, el sistema de cierre se compone de sistemas mecánicos, sistemas hidráulicos y sistemas mecánico-hidráulicos.

Por quinto y último lugar, los moldes de inyección se componen de: bebedero, mazarota, canales de alimentación, ramificaciones, cavidades de moldeo y recortes. El molde se apoya sobre la tobera por el bebedero que, tras finalizar el moldeo, se convierte en la mazarota. Mediante los canales de alimentación, el plástico llega a las cavidades de moldeo. El plástico sólido que se queda en los canales de alimentación se denomina ramificaciones. La mazarota y las ramificaciones deben ser eliminadas posteriormente, por lo que se denominan recortes.

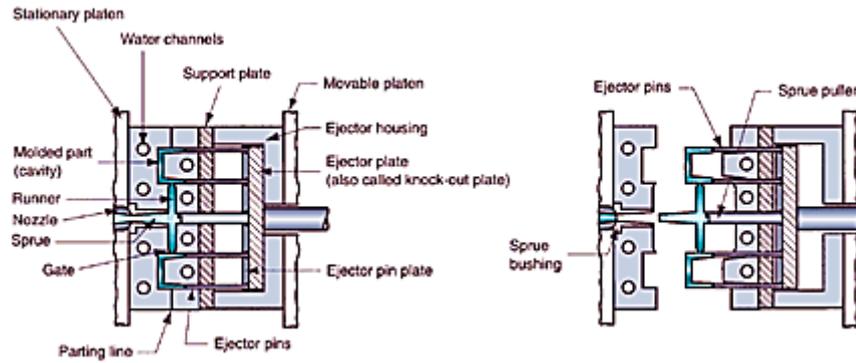


Figura 4 - Esquema de un molde de una máquina de inyección de plástico [4]

### 2.3. Sistema hidráulico

Las máquinas sujetas a estudio en el presente trabajo son dos: la Negri Bossi CANBIO sT 320 y la Krauss Maffei Serie Cx 350. Ambas, atendiendo al sistema hidráulico, presentan un esquema como el que se muestra en la Figura 5. Como se puede observar y extraer del esquema, el sistema hidráulico realiza una serie de funciones: cierre y apertura del molde, avance y retroceso del pistón de inyección, avance y retroceso del grupo de inyección, la rotación del husillo y la expulsión de las piezas [5], por lo que se justifica la razón de la relevancia de este sistema en el funcionamiento de la máquina.

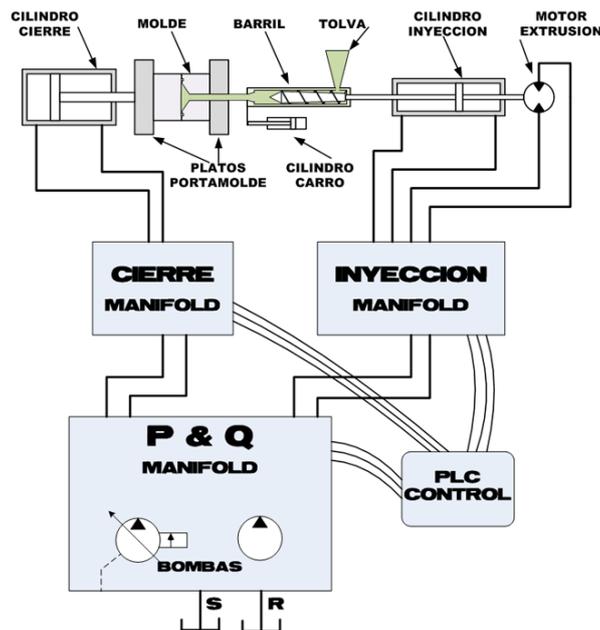


Figura 5 - Esquema del sistema hidráulico de una máquina de inyección de plástico [6]

A continuación se plasmará con más detalle todos los componentes pertenecientes o relacionados con el sistema hidráulico:

- Motor hidráulico

El motor hidráulico tiene como función convertir la energía hidráulica en energía mecánica, o en otras palabras, la presión y el caudal de aceite en par y velocidad.

- Grupo motor-bomba

La bomba hidráulica se encarga de transformar la energía mecánica recibida del motor eléctrico en energía hidráulica.

La potencia de una bomba determina la velocidad máxima de inyección, la velocidad tangencial y par del husillo en la fase de calentamiento del material plástico, las velocidades de apertura y cierre del molde y la expulsión de las piezas inyectadas.

- Regulación de fuerza y velocidad

Las válvulas proporcionales de presión y caudal regulan la fuerza y la velocidad de los movimientos de la máquina.

## **2.4. Sistema refrigerante**

El sistema refrigerante propuesto en este trabajo pertenece a las máquinas de BMB con modelos 450, 700, 850, 1150 y 1700.

Para el correcto enfriamiento de las máquinas de inyección de plástico hay que considerar que una parte del trabajo mecánico realizado por la bomba hidráulica se transfiere en forma de calor al aceite, aumentando pues su temperatura.

Al estar la temperatura óptima de funcionamiento en el intervalo entre 45°C y 50°C, es necesario disponer de un sistema de refrigeración para el aceite. Es contraproducente tener el aceite hidráulico fuera de este intervalo debido a que si éste

está demasiado frío el motor de la bomba requerirá un gran consumo de energía para poder trabajar con el aceite, por lo que la vida útil de la bomba se verá acortada. Por otra parte, si el aceite hidráulico está demasiado caliente, se convierte en un fluido con una viscosidad tan baja que puede permitir que éste se filtre por las juntas del sistema y comprometa al sistema. En conclusión, si el aceite hidráulico no se encuentra dentro de la temperatura de trabajo óptima, la vida útil siempre se verá reducida [7].

Para garantizar que la temperatura se mantenga dentro de los límites establecidos, en el depósito de aceite se instala un enfriador que refrigera el aceite y un calentador que evita arranques en frío de la máquina. Para regular la temperatura del líquido refrigerante, el sistema posee un conjunto de caudalímetros o reguladores de flujo que permiten el control del líquido a través del todo el conjunto.

## **3. ACEITES HIDRÁULICOS INDUSTRIALES**

### **3.1. Introducción**

Los principios de los aceites hidráulicos industriales son los mismos que en los aceites hidráulicos no industriales, la transmisión de energía para la producción de un trabajo mediante un líquido. Cualquier líquido o mezcla de líquidos es capaz de actuar como un fluido hidráulico pero dentro del rango de condiciones (presión, temperatura...) que permiten que sus propiedades físicas sean las idóneas para realizar tal propósito. Por ejemplo, las mezclas agua-glicol y agua-aceite se encuentran limitadas por la temperatura debido al bajo punto de ebullición del agua. Otro ejemplo son los fluidos resistentes al fuego, pero debido a su elevado precio no son utilizados comúnmente salvo que su uso sea del todo necesarios. Como opción más extendida, el aceite derivado del petróleo es el más utilizado en la industria debido a que presenta unas propiedades que lo hacen destacar frente al resto: un precio más competitivo, baja compresibilidad,...

### **3.2. Equipos de bombeo**

En equipos móviles e industriales se utilizan los mismos equipos de bombeo, los cuales utilizan los mismos fluidos a las temperaturas requeridas. La diferencia más

importante para las aplicaciones industriales es el rango de temperaturas. Esto es debido a que en una planta industrial, las variaciones de temperatura ambiente son relativamente pequeñas dado que siempre se intenta trabajar en un entorno lo más controlado posible.

Muchos equipos y sistemas industriales tienen intercambiadores de calor para controlar la temperatura del fluido hidráulico y garantizar correctamente el funcionamiento del equipo y prologar la vida útil del aceite. Una correcta temperatura del fluido hidráulico es muy importante en máquinas de control numérico dado que una variación de sólo un 20% en la viscosidad puede afectar negativamente a la operación producida por la máquina.

Otro elemento del equipo de bombeo es el depósito del aceite hidráulico. Este depósito debe mantenerse a una temperatura de 50-55°C, seco y con la máxima limpieza posible. De esta manera, se consigue aumentar la vida útil del aceite y evitar posibles problemas derivados del mal estado del aceite [8].

### **3.3. Aceites de motor**

Existen casos dónde se emplean aceites lubricantes de motor como fluidos hidráulicos en máquinas de inyección de plástico. Pero cuando éstos son utilizados prestan el inconveniente de que se oxidan con rapidez. La oxidación es, en consecuencia, un factor a tener en cuenta dado que afecta considerablemente las prestaciones del aceite. Tal y como se indicará más adelante, los aceites hidráulicos están especialmente diseñados para hacer frente a este fenómeno degradativo. Además, como la composición de los aceites de motor es más compleja que en los aceites hidráulicos, estos primeros presentan unos costes más elevados.

Aunque los aceites de motor son completamente aceptables para su uso en sistemas hidráulicos, no son la mejor opción. Debido a la formulación final del aceite de motor, existen una serie de aditivos del paquete de aditivación que generan efectos que no son del todo deseables que ocurran. Este es el caso de los aditivos detergentes, los cuales emulsionan el agua (u otra mezcla refrigerante-agua), por lo que es capaz de mantenerla en suspensión provocando que se recircule por todo el sistema pudiendo afectar a las bombas hidráulicas de extrema presión. Por esa razón, el aceite hidráulico, se encuentra especialmente formulado para evitar este fenómeno y presenta unos niveles de control de la cantidad de agua más severos que los aceites de motor.

### **3.4. Aceites hidráulicos más comunes**

Los aceites hidráulicos más comunes son los formulados a partir de base mineral con una tipo de aditivación antioxidante o con una aditivación más rica (aditivos antioxidantes y antidesgaste) [8]. La aditivación de la base mineral del aceite proporciona un aumento de la vida útil del aceite dado que evitan o previenen la degradación y/o contaminación del mismo.

Los aceites minerales con únicamente aditivos antioxidantes eran ampliamente utilizados en aplicaciones industriales. Pero, debido a que los equipos de bombeo trabajan a presiones levadas, este tipo de aceites presentan carencias para cuando se requieren trabajar a presiones más elevadas dado que no cumplen con el nivel mínimo aceptable para ciertas aplicaciones industriales.

Es por eso, que los aceites hidráulicos que presentan en su formulación el paquete de aditivos antidesgaste, son los aceites hidráulicos más utilizados en la actualidad dado que no presentan el problema de trabajar con presiones elevadas.

Otro factor a tener en cuentas en los aceites hidráulicos es, además del paquete de aditivos que presentan, la base empleada. Bases de baja calidad con los aditivos presentan el inconveniente de que una vez consumidos los aditivos, el aceite se degrada rápidamente. Mientras que si la base empleada presenta un nivel de calidad superior permite la posibilidad de que cuándo el paquete de aditivos se consuma, se pueda seguir mantener el aceite en uso un periodo de tiempo más sin que se produzcan barros y barnices en el sistema hidráulico.

### **3.5. Aditivos**

Los aditivos son una serie de compuestos químicos que son añadidos a la base minarla en proporciones pequeñas, no superiores al 15% de la composición final del aceite. La variedad de aditivos atiende a la variedad de necesidades o propiedades que se le requiera incorporar a un aceite.

Para el caso de los aceites hidráulicos, existen dos tipos de familias de aditivos: los aditivos antioxidantes y los aditivos antidesgaste. Para el primer tipo, como los aceites se degradan mediante una reacción autocatalítica llamada de autoxidación, el aditivo antioxidante tiene como propósito ser sacrificado en vez del aceite, es decir, el

oxígeno presenta una mayor afinidad por reaccionar con el aditivo en vez de oxidar aceite, por lo que lo preserva. Para el caso de los aditivos antidesgaste, su misión es mantener (en las condiciones en las que trabaje el aceite hidráulico) aquellas partes o elementos que presentan una movilidad relativa, sus superficies no entren en contacto y empiecen a desgastarse.

Uno de los aditivos más extendidos son los aditivos de dialquil-ditiofosfato de zinc (ZDDP), los cuales han sido usados durante más de 50 años por su multifuncionalidad y su bajo precio. La ventaja de este aditivo, frente a otras alternativas más caras en el mercado, es su gran poder como aditivo antidesgaste, ser un buen moderador de la extrema presión y un excelente inhibidor de la oxidación y la corrosión.

El ZDDP actúa principalmente como agente antidesgaste pero muestra condiciones para moderar las características de extrema presión. Además, opera bajo unas condiciones mixtas de lubricación con una fina capa de aceite que separa las dos partes metálicas. Sin embargo, las asperezas de las superficies atraviesan intermitentemente la capa de aceite, produciendo rozaduras entre las capas metálicas. El ZDDP reacciona con estas asperezas para reducir el contacto. Cuando la carga es suficientemente grande para que la capa de aceite colapse, el ZDDP reacciona con toda la superficie metálica para prevenir la soldadura y reducir el desgaste [9].

### **3.6. Filtrado**

Para garantizar que el aceite hidráulico no presente elementos contaminantes (partículas, lodos,...) se le realiza un procedimiento de filtrado, el cual puede ser realizado mediante filtros en línea o portátiles. Normalmente, un filtrado de 10 micras es suficiente pero, según que aplicación, es necesario incrementar las exigencias del filtrado llegando a realizar un filtrado de 5 micras. Turbinas y máquinas de control numérico requieren la filtración más pequeña (5 micras) debido a su importancia y complejidad.

El objetivo del filtrado es eliminar polvo, suciedad y cualquier elemento extraño presente en el aceite y que circularía en el sistema hidráulico. Los filtros se colocan antes de la bomba de aspiración dado que es la que impulsa el aceite del cárter al resto de la máquina. El cárter de un aceite hidráulico normalmente está muy limpio y no presenta partículas metálicas. No obstante, no se aconseja rellenar el cárter sin tenerlo

acondicionado para el relleno (limpio de cualquier suciedad), ya que puede provocar contaminación en el aceite nuevo.

El grado de filtrado está determinado por las micras del filtro. Estos filtros, según el paso que permiten, presentan un coste u otro: cuando se requieren filtrar partículas muy pequeñas el precio del filtro se incrementa dado que son más difíciles de remover y además los filtros duran menos tiempo. Pero si se requieren filtrar partículas grandes, los filtros prestan un correcto rendimiento de filtrado y su vida útil más dilatada que en los primeros. Pero, como las partículas que pueden aparecer en el aceite hidráulico presentan una ventana de diámetros bastante ancha (de pocas micras hasta ser posible ser detectadas a simple vista), por lo que los filtros no son capaces de sustraer todas las partículas dado que siempre se producirá un efecto de acumulación de partículas pequeñas que son capaces de pasar a través del filtro y van provocando la saturación del aceite hasta que se tenga que cambiar [8].

Los filtros son menos eficientes nada más ser instalados debido a que los poros se van congestionando a medida que el fluido circula y deja menos espacio para el paso de partículas. Este proceso es beneficioso hasta que la sección de paso es tan pequeña que la presión aumenta excesivamente y el filtro empieza a realizar la función inversa. En ese momento, el filtro debe ser limpiado o reemplazado por uno nuevo.

### **3.7. Problemas habituales y soluciones**

Los sistemas hidráulicos pueden presentar problemas comunes como: una vida corta del equipo de bombeo, una vida corta del filtro, un sobrecalentamiento del aceite, una vida corta del aceite o presencia de espuma en la reserva de aceite [8,9].

Para determinar las causas de los problemas anteriores, se pueden considerar factores como: una viscosidad o aceite impropio para la aplicación, un nivel de aceite incorrecto, un calendario de mantenimiento no seguido, el filtro no actúa correctamente, presencia de contaminación, variaciones de presión o una excesiva temperatura en la reserva de aceite.

Tras obtener una muestra del aceite, si hay gran cantidad de suciedad será debida probablemente a un exceso de suciedad en la reserva del aceite que no ha sido limpiado durante el cambio de aceite o a un filtro que está funcionando de una manera inadecuada.

Si se observa presencia de agua, probablemente exista una fuga en el sistema de refrigeración o que un limpiador con base acuosa haya sido utilizado para limpiar el sistema interno. La presencia de refrigerante en el aceite se muestra como una pequeña nube entre el agua y el aceite. Si se encuentran barros o barnices en el aceite podría ser debido a la oxidación o contaminación del aceite.

## **4. LÍQUIDOS REFRIGERANTES**

El sistema de refrigeración está diseñado para procurar una temperatura de funcionamiento adecuada y mantenerla para cualquier proceso operativo. Para ello, se monitorizan diferentes síntomas que permiten evaluar el estado y el funcionamiento del sistema [10].

### **4.1. Temperatura del refrigerante**

Se mide la temperatura del refrigerante en un punto crítico del sistema. Mediante su monitorizado, se puede determinar si existe un funcionamiento anormal producido por un aumento de la temperatura (sobrecalentamiento) o por una disminución de la temperatura (subenfriamiento).

El sobrecalentamiento es el fallo más común y suele ser causado por un falta de refrigerante debido a fugas, por anomalías en el sistema o por una bomba de refrigerante defectuosa.

### **4.2. Consumo del refrigerante**

El consumo de refrigerante es la cantidad de refrigerante perdida, principalmente debido a fugas, y que es necesario reponer. Las fugas externas son debidas a la falta de estanqueidad dónde el líquido refrigerante sale al exterior de la máquina, mientras que en las fugas internas, el líquido refrigerante pasa a otros sistemas de la máquina.

El consumo de refrigerante disminuye su volumen total en el circuito y, por lo tanto, reduce la capacidad de disipar calor. La pérdida de disipación de calor está ligada con el sobrecalentamiento del sistema.

### **4.3. Presión del circuito de refrigeración**

Normalmente, el sistema de refrigeración está presurizado mediante una válvula de sobrepresión para aumentar la temperatura de ebullición del fluido refrigerante de ese modo se garantiza que el fluido no se evapore y circule por el sistema en fase líquida. Una caída de la presión es indicativo de un fallo en la válvula de sobrepresión o de una fuga en el sistema de refrigeración.

### **4.4. Estado del refrigerante**

Mediante el análisis del estado del refrigerante se puede determinar el momento óptimo para realizar un cambio de refrigerante y, además, diagnosticar fallos en el sistema.

El estado del líquido refrigerante está determinado principalmente por tres factores: el tipo de líquido refrigerante, el tiempo de funcionamiento y el estado de los elementos del sistema de refrigeración. Debido al efecto de las reposiciones o rellenos, a la corrosión de los conductos y a la degradación de los aditivos, se incrementa la contaminación y la degradación cuanto más tiempo de utilización tiene el refrigerante.

El fluido refrigerante se compone de una mezcla de agua y anticongelante (etilenglicol, propilenglicol u otros) a la que se le añaden aditivos inhibidores de la corrosión. Una técnica muy extendida para realizar un seguimiento rápido del estado del refrigerante es mediante el uso de un refractómetro, con el cual se puede determinar la concentración de anticongelante en el agua.

# 5. TÉCNICAS ANALÍTICAS

## 5.1. Valoración termométrica

El grado de acidez o basicidad se expresa por el número de neutralización respectivo, definido como la cantidad equivalente de hidróxido de potasio (KOH) requerida para neutralizar el contenido ácido o básico de un gramo de muestra. Los aceites usados aportan información del grado de contaminación y degradación que presentan a través del aumento de la acidez y de la disminución de la basicidad que poseen en relación al aceite en nuevo [11].

El parámetro utilizado para la medida de la acidez es el índice de acidez total, también llamado TAN (Total Acid Number), y representa los miligramos de KOH necesarios para neutralizar todos los constituyentes ácidos de la muestra de aceite. Por otra parte, la reserva básica se expresa mediante el parámetro TBN (Total Base Number) que representa los miligramos de KOH necesarios para neutralizar los constituyentes alcalinos en un gramo de muestra [11].

Con el uso de los aceites, se van realizando unos procesos químicos que derivan en la aparición de ácidos, de los cuales es necesario conocer su concentración. Uno de los términos más extendidos para cuantificar dicha concentración es la valoración termométrica, utilizada en el desarrollo de este trabajo a través del equipo 859 Titrotherm de Metrohm, mostrado en la Figura 6.



Figura 6 - Valoración termométrica mediante el equipo de Metrohm

La valoración termométrica del índice de acidez se realiza mediante el estándar ASTM D8045: *Standard Test Method for Acid Number of Crude Oils and Petroleum Products by Catalytic Thermometric Titration* [12], mientras que para determinar el índice de basicidad se ha seguido el protocolo establecido en *Application Bulletin 405/2 EN: Determination of the total base number in petroleum products* en el apartado *Thermometric determination* [13], páginas 6 y 7, de Metrohm.

Para realizar el experimento, el reactivo valorante (disolución de concentración conocida) se agrega progresivamente a la muestra a valorar (concentración de analito desconocida) hasta alcanzar el punto de equivalencia, el cual determina la concentración de analito presente en la muestra. En una valoración termométrica se obtiene el punto de equivalencia mediante una inflexión de la curva generada por la medición de la temperatura en la reacción [14].

## **5.2. Constante dieléctrica**

La constante dieléctrica es la relación entre la densidad de un flujo eléctrico producido en un material y el valor en el vacío proporcionado por la misma intensidad de campo eléctrico [14,15].

Al comparar las mediciones obtenidas de aceites utilizados y sin utilizar de la misma marca, se puede determinar el grado de cambio de la constante dieléctrica del aceite. El cambio dieléctrico está relacionado con la degradación y contaminación del fluido y ayuda a optimizar los intervalos de cambios de aceite, a detectar el desgaste y conocer la pérdida de propiedades lubricantes del aceite. Si la desviación es negativa, es indicativo de la presencia de combustible en el aceite. Si la desviación es ligeramente positiva, el aceite posee ácidos, suciedad, carbonilla, lodos u oxidación. Por otra parte, si la desviación es extremadamente positiva, hay presencia de anticongelante, partículas metálicas o agua, tal y como se puede apreciar en la Tabla 1.

### Desviación

Parámetros	Negativa	Ligeramente positiva	Extremadamente positiva
Ácido		X	
Anticongelante			X
Suciedad		X	
Carbonilla		X	
Combustible	X		
Partículas metálicas			X
Oxidación		X	
Lodos		X	
Agua			X

Tabla 1 – Tabla de desviaciones en función de los diferentes parámetros

El equipo utilizado en el desarrollo de este trabajo es el Oil check monitoring TMEH 1 de SKF (Figura 7), el cual es un instrumento portátil equipado con un indicador numérico y una escala verde/roja para facilitar su uso. Dentro de la banda verde el aceite se considera aceptable, mientras que dentro del área roja se debe proceder al cambio de aceite.



Figura 7 - Oil check monitoring TMEH 1 de SKF

### 5.3. Contaje de partículas

El contaje de partículas clasifica las partículas por tamaño indicando la concentración de las mismas para cada tamaño pero no determina su composición. El nivel de contaminación por partículas a nivel industrial se expresa por la norma internacional *ISO 4406: Hydraulic fluid power – Fluids – Method for coding the level of contamination by solid particles* [16].

La normativa ISO 4406 de 1987 expresa el resultado mediante un código de dos dígitos con la calificación  $R_5 / R_{15}$ . El primero corresponde al número de partículas de tamaño superior a  $5 \mu\text{m}$  por mililitro de fluido. El segundo, el número de partículas superiores a  $15 \mu\text{m}$  por mililitro de fluido.

Actualmente, la norma ISO 4406 considera tres grupos de evaluación, partículas mayores de  $4 \mu\text{m}$  por mililitro de fluido, partículas mayores de  $6 \mu\text{m}$  por mililitro de fluido y partículas mayores de  $14 \mu\text{m}$  por mililitro de fluido, con la correspondiente calificación  $R_4 / R_6 / R_{14}$ . Mientras que las partículas superiores a  $4$  y  $6 \mu\text{m}$  son indicativas de las formaciones de depósitos, las partículas superiores a  $14 \mu\text{m}$  indican la cantidad de partículas grandes que puedan dar lugar a un fallo catastrófico. En la Tabla 2, se observa el código ISO en función de la cantidad de partículas por 1 mililitro de fluido [17].

**Cantidad de partículas por 1 mL de fluido**

<b>Código ISO</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>
1	0,01	0,02
2	0,02	0,04
3	0,04	0,08
4	0,08	0,16
5	0,16	0,32
6	0,32	0,64
7	0,64	1,30
8	1,3	2,5

9	2,5	5,0
10	5	10
11	10	20
12	20	40
13	40	80
14	80	160
15	160	320
16	320	640
17	640	1.300
18	1.300	2.500
19	2.500	5.000
20	5.000	10.000
21	10.000	20.000
22	20.000	40.000
23	40.000	80.000
24	80.000	160.000
25	160.000	320.000
26	320.000	640.000
27	640.000	1.300.000
28	1.300.000	2.500.000

*Tabla 2 - Código ISO en función de la cantidad de partículas por mililitro*

El recuento de partículas presenta la principal desventaja de producir resultados confusos ya que cuantifica todo tipo de partículas. Por este motivo, no es un método recomendado para realizar un seguimiento del desgaste en el cual únicamente se desea conocer las partículas metálicas provenientes del desgaste y, por lo tanto, se utiliza principalmente como técnica complementaria.

El contador de partículas utilizado en el desarrollo de este trabajo se basa en el recuento por oscurecimiento de la luz con el sensor OilWear S100 de Atten2 Advanced Monitoring Technologies, mostrado en la Figura 8. La muestra circula por un conducto a una velocidad perfectamente definida y la sección queda iluminada por una fuente de luz blanca. Las partículas presentes absorben luz y un fotodiodo cuantifica el tamaño de las mismas.



Figura 8 - Contador de partículas con sensor Oilwear S100 de Atten2 Advanced Monitoring Technologies

## 5.4. Contenido en agua

El contenido en agua se ha determinado en este estudio mediante una celda específica del equipo portátil Oil Test Centre Kittiwake del mini-laboratorio de análisis rápidos Wärsilä NSD desarrollado por la empresa Kittiwake Developments Ltd. La celda en cuestión permite analizar muestras con contenidos de agua hasta el 2,5% de agua (en volumen) con una resolución de  $\pm 0,1\%$ . El límite máximo se puede aumentar modificando el protocolo de medida con la celda proporcionado por Kittiwake, consiguiendo así medir niveles de cantidades de agua superiores.

La base para la obtención de la medida es el uso del Reactivo A (líquido) y del Reactivo B (sólido) que reaccionan de forma exotérmica con la presencia de agua. La reacción genera un aumento de presión en el interior de la celda que es convertido en una lectura del contenido de agua presente.

## 5.5. Densidad

La densidad es una propiedad relacionada con la naturaleza y la fabricación del aceite. La densidad se suele reflejar como gravedad específica (SG) a 15°C siendo esta la relación entre la densidad del aceite y la densidad del agua.

En la industria petrolera se utiliza una unidad derivada de la gravedad específica llamada °API y definida como se muestra en la ecuación (1):

$$^{\circ}API = \frac{141,5}{SG} - 131,5 \quad (1)$$

Donde:

$^{\circ}API$ , es una unidad derivada de la gravedad específica.

$SG$ , es la gravedad específica.

La medida de esta variable se realiza mediante el estándar ASTM D1298: *Standard Test Method for Density, Relative Density, or API Gravity of Crude Petroleum and Liquid Petroleum Products by Hydrometer Method* [18], pero debido a que la cantidad de muestra es superior a la disponible, se ha optado por realizar la medida de la densidad mediante el estándar ASTM D1217: *Standard Test Method for Density and Relative Density (Specific Gravity) of Liquids by Bingham Pycnometer* [19].



Figura 9 - Pícnómetro capilar con termómetro

En el desarrollo de este trabajo se han utilizado dos picnómetros de capilar lateral de Duran Brand con termómetros de Gold Brand, mostrado en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** El primer picnómetro tiene la afora en la marca derecha con un volumen de 9,997 mililitros y un termómetro 50784. El segundo tiene la afora en la marca izquierda, un volumen de 10,497 mililitros y un termómetro 50787.

Conocido el volumen de cada picnómetro, se pesa en la balanza en vacío y, después, con muestra en su interior a la temperatura acordada. Mediante la ecuación (2) se puede determinar la densidad del fluido:

$$\rho = \frac{M_{LL} - M_V}{V} \quad (2)$$

Donde:

$\rho$ , es la densidad del fluido (en gramos/mililitro).

$M_V$ , es la masa en vacío del picnómetro (en gramos).

$M_{LL}$ , es la masa del picnómetro lleno, con la muestra en su interior (en gramos).

$V$ , es el volumen del picnómetro (en mililitros).

## 5.6. Espectrometría infrarroja

La espectrometría infrarroja es un método de análisis mediante el cual es capaz de determinar cualitativamente, y en gran parte cuantificar, los compuestos presentes en una muestra. La determinación se realiza a partir del estudio de absorción de radiación infrarroja a diferentes longitudes de onda [11].

La técnica proporciona información importante mediante una comparación de la muestra de un aceite usado frente al mismo nuevo. En esta técnica, es frecuente encontrarse con fenómenos de interferencias y/o enmascaramiento de señales por lo que, en caso de duda, es conveniente realizar la determinación cuantitativa con minuciosidad y rigor y a poder ser corroborando mediante otra vía o técnica analítica para garantizar la respuesta.

La región infrarroja está comprendida entre  $3 \cdot 10^{12}$  y  $3 \cdot 10^{14}$  Hz de frecuencia en el espectro electromagnético. El intervalo de frecuencia también se puede expresar en

longitud de onda y éste está comprendido entre 100  $\mu\text{m}$  y 1  $\mu\text{m}$  de longitud de onda. Además, normalmente se suele expresar como número de ondas (en  $\text{cm}^{-1}$ ), el cual es la inversa de la longitud de onda.

La región infrarroja se divide comúnmente en tres regiones: región cercana (NIR), región media (mid-IR) y región lejana (FIR). La región más interesante para identificar compuestos orgánicos es la región media, entre 4000 y 400  $\text{cm}^{-1}$ . La región cercana, comprendida entre 14290 y 4000  $\text{cm}^{-1}$ , no resulta práctica para esta identificación porque en esta región aparecen los armónicos de las frecuencias naturales de las moléculas (esto no descarta que tenga otra aplicación de interés). Por otra parte, la región lejana, entre 400 y 200  $\text{cm}^{-1}$ , tampoco resulta de interés ya que se aprecian las vibraciones propias de las moléculas [11].

Un espectro infrarrojo es un conjunto de frecuencias en las que se producen las absorbancias infrarrojas de los compuestos orgánicos. Se suele representar intensidad, normalmente absorbancia (A) o porcentaje de transmitancia (T), frente a su posición, generalmente longitud de onda o número de ondas. La absorbancia queda definida por la cantidad de intensidad de luz infrarroja que absorbe la muestra. Un cuerpo traslucido absorbe una cantidad de luz de un haz incidente y transmite la restante. Cuanto mayor sea la luz absorbida, menor será la transmitida y, por lo tanto, mayor será la absorbancia del cuerpo. La absorbancia está relacionada con la concentración de la muestra (C) de una manera lineal y, por lo tanto, es preferible su utilización para un análisis cuantitativo [20].

Además, la transmitancia es el logaritmo del cociente de la energía radiante transmitida por la muestra (E) entre la energía radiante incidente sobre la misma ( $E_0$ ), observable en la ecuación (3).

$$T = \log \frac{E}{E_0} \quad (3)$$

Donde:

$T$ , es la transmitancia.

$E$ , es la energía radiante transmitida por la muestra.

$E_0$ , es la energía radiante incidente sobre la muestra.

La espectrometría infrarroja presenta una serie de premisas como que las sustancias orgánicas poseen unas frecuencias de absorción características, cada sustancia tiene un espectro específico, el espectro de una mezcla es la suma de los espectros individuales y la concentración influye en la intensidad de una banda de absorción.

Para la realización de este trabajo se ha utilizado, como se muestra en la Figura 10, un Espectrómetro Infrarrojo por Transformada de Fourier (FT-IR) de A2 Technologies (actualmente perteneciente al grupo Agilent Technologies) de la serie 5500t (Figura 10), el cual se compone de un sistema óptico basado en el interferómetro de Michelson.



Figura 10 - FT-IR de A2 Technologies de la serie 5500t

La radiación incidente sobre la muestra atraviesa un espejo semirreflejante que divide el haz en dos partes iguales [14]. Los dos haces resultantes son reflejados sobre un espejo móvil y otro espejo fijo e interfieren en su viaje de vuelta siendo recogida la interferencia por el detector. Tras ello, se puede representar en un gráfico denominado interferograma que representa la intensidad frente al desfase. La transformada de Fourier es un método matemático para el desarrollo en serie del interferograma.

Los siguientes estándares ASTM han sido desarrollados principalmente para el análisis de las diferentes propiedades de los aceites lubricantes.

- ASTM E2412: *Standard Practice for Condition Monitoring of In-Service Lubricants by Trend Analysis Using Fourier Transform Infrared (FT-IR) Spectrometry* [21].

- ASTM D7214: *Standard Test Method for Determination of the Oxidation of Used Lubricants by FT-IR Using Peak Area Increase Calculation* [22].
- ASTM D7412: *Standard Test Method for Condition Monitoring of Phosphate Antiwear Additives in In-Service Petroleum and Hydrocarbon Based Lubricants by Trend Analysis Using Fourier Transform Infrared (FT-IR) Spectrometry* [23].
- ASTM D7414: *Standard Test Method for Condition Monitoring of Oxidation in In-Service Petroleum and Hydrocarbon Based Lubricants by Trend Analysis Using Fourier Transform Infrared (FT-IR) Spectrometry* [24].

Los estándares anteriores se diferencian en la manera de cuantificar la presencia de los compuestos. Al realizar un análisis cuantitativo se necesita determinar la forma del pico mediante su altura o su área e interpolándolo con una línea de referencia. El equipo utilizado emplea una línea base doble donde dos puntos tomados del espectro marcan la base del mismo.

La oxidación, la presencia de glicoles del refrigerante y la presencia de agua son nuevos picos que aparecen en el espectro infrarrojo de un aceite usado debido a la degradación y contaminación. La utilización del aceite genera productos que contienen grupos carbonilo cuyos ácidos contribuyen a la acidificación del aceite. La presencia de los enlaces del grupo carbonilo se detecta a una frecuencia de 1700-1750  $\text{cm}^{-1}$ . Los grupos hidroxilo, que aparecen en frecuencias de 3370  $\text{cm}^{-1}$ , son debidos a la presencia de anticongelante. La presencia de agua se observa a frecuencias de 3300-3500  $\text{cm}^{-1}$  y 1600  $\text{cm}^{-1}$  debido a la vibración del enlace -OH.

## 5.7. Espectroscopia ICP-OES

La espectroscopia se basa en la interacción entre la radiación electromagnética y la materia cuando hay un intercambio de energía. Mediante la apariencia de los átomos es posible identificar el elemento porque al ser excitados producen espectros electromagnéticos característicos [14].

Los diferentes elementos generan máximos de energía a una longitud de onda e intensidad en un espectro de emisión. De las diferentes técnicas, se ha utilizado la espectroscopia de emisión atómica con fuente de ionización de plasma de acoplamiento inductivo en conjunción con un espectrofotómetro de emisión óptico, también llamado ICP-OES (Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry) o ICP-AES

(Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometry), referenciado con el estándar ASTM D5185: *Standard Test Method for Mutielement Determination of Used and Unused Lubricating Oils and Base Oils by Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometry (ICP-AES)* [25].

Este equipo excita los átomos para que los electrones pasen a niveles de energía superiores y, al cesar la excitación, regresen a sus niveles originales emitiendo energía. La intensidad de energía emitida es proporcional a la concentración del elemento.

En el espectrómetro de emisión por plasma se introduce una muestra continua en estado líquido que posteriormente mediante el proceso de nebulización es convertida en aerosol. Esta muestra pasa a la antorcha donde se excita y los átomos emiten su radiación característica. Esta radiación se clasifica en longitudes de onda y es transformada en valores de concentración. En la Tabla 3 se observan el límite de detección y los rangos mínimos y máximos de los diferentes elementos a sus respectivas longitudes de onda.

<i>Elemento</i>	<i>Longitud de onda (nm)</i>	<i>Rango mínimo (ppm)</i>	<i>Rango máximo (ppm)</i>	<i>Límite de detección (ppm)</i>	<i>Aditivo</i>	<i>Desgaste</i>
<i>Ag</i>	328,070	0,5	50	0,6		X
<i>Al</i>	308,220	6	40	1		X
<i>B</i>	208,959	4	30	1	X	
<i>Ba</i>	233,530	0,5	4	0,03	X	
<i>Ca</i>	184,006	40	9000	0,05	X	
<i>Cr</i>	205,550	1	40	0,2		
<i>Cu</i>	327,396	2	160	0,4		X
<i>Fe</i>	259,940	2	140	0,1		X
<i>Mg</i>	279,079	5	1700	0,04	X	
<i>Mn</i>	257,610	5	700	0,1		X
<i>Mo</i>	202,030	5	200	0,5	X	

Na	589,590	7	70	0,5	X
Ni	231,600	5	40	0,5	X
P	178,290	10	1000	4	X
Pb	220,350	10	160	1	X
Si	251,610	8	50	10	X
Sn	189,990	10	40	2	X
Ti	334,940	5	40	0,4	X
V	292,400	1	50	0,5	X
Zn	481,050	60	1600	0,2	X

Tabla 3 - Longitud de onda (nm), rango (ppm), limite de detección (ppm) para la tecnología ICP-OES

El equipo utilizado en el desarrollo de este trabajo es el ICP-OES de Thermo Scientific, modelo iCAP 7400 con configuración radial (Figura 11), con un sistema automostreador Autosampler CETAC ASX-520+.



Figura 11 - ICP-OES de Thermo Scientific, modelo iCAP 7400 con configuración radial

Está compuesto principalmente por los siguientes elementos [14]:

- Sistema de gases: Se utiliza argón ya que posee un potencial de ionización elevado y dispone de una energía suficiente para excitar todos los elementos.
- Bomba peristáltica: Impulsa la muestra a través de unos tubos mediante unos rodillos para introducirla en el nebulizador. La muestra únicamente entra en contacto con las paredes de los tubos, como se observa en la imagen.
- Nebulizador concéntrico de vidrio del tipo V-groove: Transforma el líquido en aerosol. El surco en forma de V tiene dos orificios, el superior para el líquido y el inferior para el gas. Cuando la muestra sale por el orificio superior, cae por efecto de la gravedad y alcanza el orificio inferior por el que está saliendo el argón. Ambas corrientes interaccionan generando el aerosol.
- Cámara de nebulización ciclónica de paso doble (Figura 12): Homogeniza el aerosol procedente del nebulizador. Este tipo de cámaras permite únicamente el paso de gotas de tamaño inferior a 10  $\mu\text{m}$  eliminando las que son superiores a dicho tamaño.



*Figura 12 - Cámara de nebulización ciclónica de doble paso*

- Antorcha vertical de cuarzo: Formada por tres tubos concéntricos. Por el externo, entre 9 y 27 mm de diámetro, circula argón para refrigeración de la antorcha. Por el intermedio, se aporta el argón para la formación del plasma. Por el interno, se inyecta la muestra hacia el plasma.

- Generador de radiofrecuencias: Aplica la energía necesaria para sustentar y confinar el plasma. Este equipo genera y aplica una frecuencia de 27,12 MHz y una potencia entre 750-1500 W.
- Sistema óptico: Separa el haz policromático en cada una de las radiaciones monocromáticas que lo componen. El policromador es un sistema que emplea un conjunto de múltiples rendijas de salida y detectores dentro de un mismo espectrofotómetro. En un policromador, cada rendija de salida permite un análisis elemental, por lo que, al estar cada rendija de salida alineada con una línea atómica, es posible realizar un análisis multielemental simultáneo. El diseño utilizado es un montaje tipo Echelle debido a que presenta una muy buena eficiencia y resolución. La rejilla divide la radiación policromática en longitudes de onda produciendo órdenes espectrales que se superponen. Un dispositivo de separación dispersa las ordenes superpuestas en un patrón bidimensional.
- Detector tipo CID: La radiación monocromática que sale a través de la rendija es recogida por un detector de estado sólido que transforma la señal óptica en impulsos eléctricos que puedan identificar y cuantificar las herramientas informáticas. Los detectores de estado sólido son circuitos que presentan una gran sensibilidad porque contienen un número determinado de condensadores. El detector utilizado en este trabajo es del tipo Charge Injection Device (CID) puede cuantificar la cantidad de carga acumulada en el tiempo que el dispositivo ha sido expuesto a la luz mediante un proceso no destructivo [14].

## 5.8. Medida del pH

El pH es una unidad adimensional de medida de basicidad o acidez de una solución. Se mide de manera precisa mediante un potenciómetro, el cual mide la diferencia de potencial entre dos de electrodos. Uno de ellos es llamado de referencia y suele ser de cloruro de plata, mientras que el otro es de vidrio y sensible al ion de hidrógeno.

Los ácidos y bases tiene diferentes concentraciones de iones de hidrógeno y el pH es el encargado de expresar el valor numérico de dichas concentraciones. La escala logarítmica del pH se compone de 14 unidades, siendo el valor de pH de máxima acidez

0 y el pH de máxima basicidad 14. El pH neutro se corresponde con el valor 7 y está asociado al agua pura.



Figura 13 - pH Meter Basic 20 de Crison

El equipo utilizado en el desarrollo de este trabajo es el pH-Meter Basic 20 de Crison (Figura 13), el cual cumple las normas UNE-EN 61010-1: *Safety requirements for electrical equipment for measurement, control and laboratory use – Part 1: General requirements* [26] y UNE-EN 61326-1: *Electrical equipment for measurement, control and laboratory use – EMC requirements – Part 1: General requirements* [27].

Para realizar una medición correcta, se debe realizar calibraciones periódicas del equipo con disoluciones tampón. Se ha realizado la calibración en tres puntos, la cual es aconsejable para medir en toda la escala de pH. Como primer punto se ha escogido pH 7,00, y como segundo y tercer punto pH 4,01 y pH 9,21, respectivamente.

La medida se realiza por estabilidad en la que la lectura no se fija en la pantalla hasta que la señal del electrodo varíe menos de 0,01 pH durante 6 segundos. El electrodo utilizado es el 50 11 (Figura 14), el cual puede medir el pH entre 2 y 14 a una temperatura entre 0 y 80°C con una resolución de 0,01. Además, posee un alambre de cloruro de plata, un diafragma y electrolito CRISOLYT A.



*Figura 14 - Electrodo 50 11 de Crison*

## **5.9. Refractometría**

El principio de la refractometría se basa la medición del índice de refracción de la luz. Más conectoramente, la desviación de la luz al pasar de un medio a otro de diferente naturaleza, lo cual provoca una desviación en su dirección de propagación, el cual se puede escalar.

El cambio de dirección de un rayo de luz que pasa oblicuamente de un medio a otro de diferente densidad cuando atraviesa la superficie se denomina refracción. La velocidad de la luz se hace más lenta cuando más denso sea el medio por el que pasa la luz, por lo que, si el segundo medio es más denso que el primero, el rayo de luz se aproxima a la perpendicular trazada sobre la superficie divisoria en el punto de incidencia.

Con el refractómetro aprovechamos el fenómeno de la desviación de la dirección de propagación de la luz al pasar de un medio a otro diferente. Esta desviación se encuentra directamente relacionada con la concentración, por lo que, al pasar a medios dónde la concentración de solutos es más elevada la desviación será mayor.

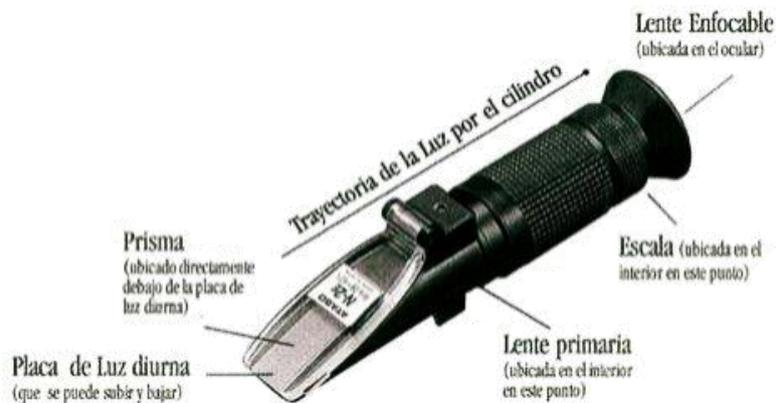


Figura 15 - Refractómetro de mano con escala BRIX

En el desarrollo de este trabajo, se ha preparado una serie de patrones de etilenglicol (ETG) y agua (H<sub>2</sub>O) donde el agua es el disolvente y el etilenglicol el soluto. Mediante un refractómetro de mano provisto de una escala BRIX (Figura 15), se tradujo dicha escala a %ETG (%m/m). De modo que, al introducir la muestra en el refractómetro, la desviación de la luz que este provocaba se podría traducir al %ETG que contenía la muestra.

## 5.10. Viscosidad cinemática

La viscosidad es un parámetro que determina el movimiento de un determinado fluido bajo unas condiciones específicas. La viscosidad de un fluido se relaciona con las fuerzas intermoleculares y la estructura química de las especies que lo conforman. Mientras menor sea la interacción entre las moléculas de un líquido, menor es su viscosidad y viceversa. Además, la viscosidad está influenciada por las variaciones en la composición del aceite y por las condiciones externas de presión y temperatura [14].

En aplicaciones de ingeniería, generalmente se utilizan viscosímetros capilares y rotacionales. Entre estos dos tipos de viscosímetros, los capilares se utilizan para fluidos newtonianos y los rotacionales para fluidos no newtonianos.

La temperatura genera una gran influencia en la viscosidad, por esa razón las medidas se realizan en un entorno donde la temperatura se encuentra controlada en todo momento. La forma más extendida de garantizar una temperatura controlada y homogénea es mediante el uso de baños termostáticos (Figura 16) en los cuales se sumergen los viscosímetros capilares. Gracias a estos baños, las medidas de la

viscosidad se pueden realizar a las temperaturas deseadas, normalmente 40°C y 100°C [14].



Figura 16 - Baño termostático con control de temperatura digital

Los viscosímetros capilares, utilizados en el desarrollo de este trabajo, se basan en el principio de fluencia de un volumen específico de fluido a través de un capilar que está inmerso en un baño térmico, tal y como se refleja en la norma ASTM D445: *Standard Test Method for Kinematic Viscosity of Transparent and Opaque Liquids (and Calculation of Dynamic Viscosity)* [28].

Mediante la ley de Poiseuille para flujos constantes y viscosos en un tubo se puede conocer el tiempo necesario para fluir por parte de un volumen determinado.

En este trabajo se ha requerido únicamente de un tipo de viscosímetro capilar llamado Cannon-Fenske (Figura 17 centro). Este viscosímetro capilar es utilizado principalmente para líquidos transparentes.

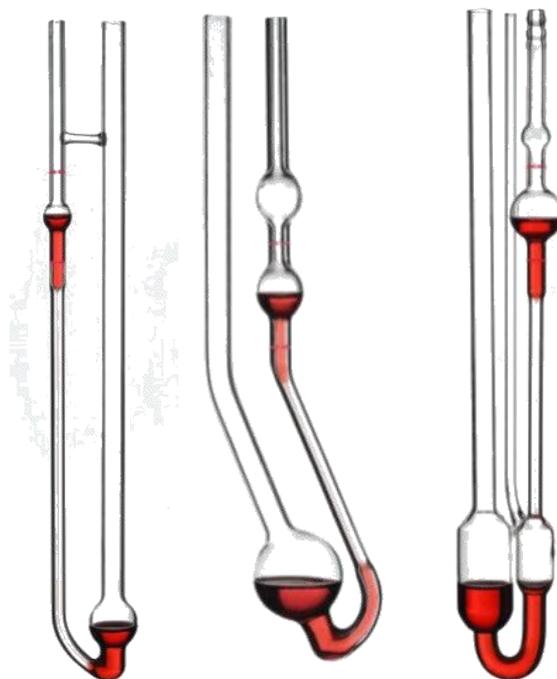


Figura 17 - Viscosímetro capilar Ostwald (izq.), Cannon-Fenske (centro), Ubbelohde (der.)

## 5.11. Voltamperometría lineal de barrido

La voltamperometría lineal de barrido es una técnica instrumental analítica mediante la cual se oxida o reduce un compuesto aplicándole un potencial. En el método voltamperométrico se varía el potencial y la intensidad de corriente para obtener información del analito [14]. La voltamperometría en lubricantes está definida en los siguientes estándares ASTM:

- ASTM D7590: *Standard Guide for Measurement of Remaining Primary Antioxidant Content in In-Service Industrial Lubricating Oils by Linear Sweep Voltammetry* [29].
- ASTM D6971: *Standard Test Method for Measurement of Hindered Phenolic and Aromatic Amine Antioxidant Content in Non-Zinc Turbine Oils by Linear Sweep Voltammetry* [30].
- ASTM D6810: *Standard Test Method for Measurement of Hindered Phenolic Antioxidant Content in Non-Zinc Turbine Oils by Linear Sweep Voltammetry* [31].

Una de las principales aplicaciones de esta técnica consiste en determinar la concentración de antioxidantes en el aceite aplicando un potencial entre 0,0 V y 1,7 V a una velocidad de 0,1 V/s para oxidarlos. Esta oxidación de antioxidantes está definida

por la facilidad de desprendimiento de un electrón, también llamado potencial de oxidación. Para ello, en este trabajo se ha utilizado el RULER Antioxidant Monitoring de Fluítec (Figura 18), un equipo portátil de fácil manejo y versatilidad que determina rápida y precisamente el estado del lubricante.



*Figura 18 - RULER Antioxidant Monitoring de Fluítec*

Tras la realización del ensayo, se obtiene como resultado un voltamperograma que representa el RUL Number frente al tiempo de barrido del voltaje. El RUL Number es un valor de intensidad a un potencial dado y directamente proporcional a la concentración de antioxidantes. Tras conocer la concentración, se puede obtener el porcentaje de vida útil remanente del aceite. El tiempo determina el tipo de aditivo, ya que cada especie tiene un potencial de oxidación diferente. Cuanto menos potencial de oxidación posean, se oxidarán antes y aparecerán antes en el voltamperograma [14].

En el estudio de aceites hidráulicos se utiliza una disolución verde en la cual el ZDDP aparece entre 6-10 segundos, las aminas entre 9 y 12 segundos y los fenoles entre 13 y 17 segundos.

Normalmente, en los lubricantes con ZDDP y fenoles, se suelen consumir antes los fenoles, mientras que, si hay ZDDP y aminas, el ZDDP es el que se consume antes. Además, es interesante seguir el consumo de ZDDP porque está íntimamente ligado con la viscosidad y el TAN. Si se agota el ZDDP, la vida del aceite se acortará porque aumentará la viscosidad y el TAN.

En muestras en las que la degradación es muy grande, la línea voltamperométrica puede estar desplazada por la formación de compuestos de oxidación. El porcentaje de vida útil remanente no debe ser nunca inferior al 25-30 % ya que, si lo es, los parámetros de viscosidad y TAN serían muy altos y perjudiciales.

## 6.RESULTADOS DE LOS ACEITES HIDRÁULICOS

### 6.1. Nomenclatura

En el desarrollo de este trabajo se ha analizado una serie de aceites hidráulicos de la marca Galp Hidrolep. Las muestras se han nombrado conociendo la máquina, el número de máquina, el espécimen y el tipo de aceite. En la Tabla 4 se observa la nomenclatura de cada aceite, siendo ésta únicamente el espécimen.

<i>Nombre</i>	<i>Espécimen</i>	<i>Nº máquina</i>	<i>Máquina</i>	<i>Aceite</i>
<i>H0</i>	H0	-	-	Referencia (nuevo)
<i>H03</i>	H03	30	Negri Bossi 320	Galp Hidrolep 46
<i>H05</i>	H05	31	Negri Bossi 320	Galp Hidrolep 46
<i>H08</i>	H08	42	Krauss Maffei 350	Galp Hidrolep 46

*Tabla 4 - Nomenclatura de los aceites hidráulicos*

Los parámetros proporcionados por la ficha de seguridad del aceite son los indicados en la Tabla 5.

<i>Ensayo</i>	<i>Método</i>	<i>Resultado</i>
<i>Grado ISO</i>	-	46
<i>Densidad a 15 °C [kg/l]</i>	ASTM D1298/D4052	0,8794
<i>Viscosidad cinemática a 40 °C [mm<sup>2</sup>/s]</i>	ASTM D445/D7042	46
<i>Viscosidad cinemática a 100 °C [mm<sup>2</sup>/s]</i>	ASTM D445/D7042	7,0
<i>Índice de viscosidad</i>	ASTM D2270	106
<i>Número de ácido [mg KOH/g]</i>	ASTM D664/D974	0,66
<i>Número de básico [mg KOH/g]</i>	ASTM D2896	0,26

*Tabla 5 - Ficha de seguridad del aceite Galp Hidrolep 46*

Los ensayos realizados a los aceites han sido constante dieléctrica, viscosidad cinemática a 40 y 100 °C, TAN, TBN, contenido de agua, FT-IR, contaje de partículas, RULER e ICP-OES.

## 6.2. Constante dieléctrica

En una primera aproximación para determinar el estado del aceite, se ha realizado un ensayo para determinar la constante dieléctrica. En la Tabla 6 se muestran los resultados obtenidos.

<i>Parámetro</i>	<i>H03</i>	<i>H05</i>	<i>H08</i>
<i>HI</i>	-0,799 (Verde)	3,99 (Verde)	>50 (Rojo)
<i>LOW</i>	-0,479 (Verde)	2,39 (Verde)	>50 (Rojo)

*Tabla 6 - Constante dieléctrica por los métodos HI y LOW*

El aceite H0 se ha tomado como referencia para calibrar el equipo. Una vez calibrado el equipo, tamaño como valor de referencia el H0, se ha procedido a medir la constante dieléctrica y se han obtenido las diferencias de los aceites usados con respecto al nuevo.

Como se puede apreciar (Tabla 6), los aceites H03 y H05 tienen unas constantes dieléctricas muy semejantes y de valores cercanos al cero, por lo que se puede determinar que presentan signos leves de degradación y contaminación. Por otra parte, el aceite H08 presenta valores muy elevados llegando a considerarse como unos valores de degradación y de contaminación excesivos.

Para complementar el estudio, se procede a realizar los ensayos previamente descritos para determinar con mayor grado de exactitud el estado real de los diferentes aceites hidráulico.

### 6.3. Viscosidad cinemática

En primer lugar, se procede a la medida de la viscosidad cinemática (KV) y el índice de viscosidad (IV) indicados en la Tabla 7.

<i>Parámetro</i>	<i>H0</i>	<i>H03</i>	<i>H05</i>	<i>H08</i>
<i>KV a 40 °C [mm<sup>2</sup>/s]</i>	47,73	52,48	52,36	49,73
<i>KV a 100 °C [mm<sup>2</sup>/s]</i>	7,07	7,23	7,20	7,35
<i>IV</i>	108	95	96	108

Tabla 7 - Viscosidad cinemática a 40 y 100 °C (en mm<sup>2</sup>/s) e Índice de viscosidad

La viscosidad es un parámetro muy importante a tener en consideración. Tanto a 40 como a 100 °C, la viscosidad aumenta ligeramente posiblemente debido a la presencia de sustancias más viscosas en el aceite (como por ejemplo subproductos de degeneración) u otros elementos contaminantes externos. Por otra parte, se considera como límite de aceptación una variación de la viscosidad de un 20%, ninguno de los aceites ensayados presenta dicha variación por lo que se consideran aceptables.

Como se puede observar, el índice de viscosidad decrece en los aceites H03 y H05, lo cual no es beneficioso para las características del aceite. Por otra parte, en el aceite H08 el índice de viscosidad se mantiene constante. Para un aceite, el índice de viscosidad debería mantenerse lo más elevado posible ya que determina las variaciones de los valores de viscosidad con respecto a la temperatura. Por ello, el aceite H08 se podría considerar en buen estado mientras que los aceites H03 y H05 habrían perdido algunas de sus propiedades. Pero al realizar los siguientes ensayos complementarios, el estado de los aceites se invierte.

## 6.4. Densidad

A continuación, se determina la densidad mediante el método de picnometría. Este ensayo proporciona información sobre la presencia de otros fluidos en una mezcla, así como de posibles partículas debido a desgaste o contaminación.

<i>Aceite</i>	<i>Densidad a 15 °C [kg/m<sup>3</sup>]</i>
<i>H0</i>	882,5
<i>H03</i>	876,2
<i>H05</i>	883,7
<i>H08</i>	880,4

*Tabla 8 - Densidad a 15 °C (en kg/m<sup>3</sup>)*

A partir de los resultados obtenidos en la Tabla 8, el aceite H05 en comparación con el H0 de referencia presenta una densidad mayor por lo que podría contener una leve presencia de líquido refrigerante debido a fugas. Los compuestos del líquido refrigerante, agua y etilenglicol, tienen una densidad de 1000 y 1116 kg/m<sup>3</sup>.

Este ensayo no es puramente representativo de la contaminación o degradación que pueda presentar el aceite y, por lo tanto, al igual que en los casos anteriores, debe ser acompañado por una serie de ensayos complementarios, explicados a continuación.

## 6.5. Valoración termométrica

El Total Acid Number (TAN) y el Total Base Number (TBN) de un aceite hidráulico no son unos valores tan elevados como en los aceites de combustión debido a que no se produce combustión en el aceite y no presentan elevadas concentraciones del paquete de aditivos de reserva básica. Por este motivo, este tipo de aceites tienen una reserva básica con valores muy pequeños como se muestra en la Tabla 9.

<i>Aceite</i>	<i>TAN [mg KOH/g]</i>	<i>TBN [mg KOH/g]</i>
<i>H0</i>	<0,5	0,34
<i>H03</i>	<0,5	0,68
<i>H05</i>	<0,5	0,42
<i>H08</i>	<0,5	0,70

*Tabla 9 - TAN y TBN (en mg KOH/g)*

La respuesta de TAN para valores por debajo de 0,5 no son fiables porque el equipo utilizado no tiene la suficiente resolución en esos valores de TAN tan bajos, dado que en origen se encuentra preparado para el análisis de aceite lubricantes de motor cuyos TAN presentan valores más elevados. Por otra parte, el TBN presenta un comportamiento completamente diferente al de los aceites de combustión. En estos segundos, el TBN decrece con el tiempo y el uso, mientras que en los aceites hidráulicos se comporta de manera contraria, aumentándolo con el uso.

Sería recomendable realizar un seguimiento del valor de TBN pero no se va a tener en cuenta para realizar el diseño del plan de mantenimiento de las máquinas dado que no es un valor representativo.

## 6.6. Contenido en agua

La presencia de agua en el aceite hidráulico será debida probablemente a una fuga en el circuito de refrigeración. Por consiguiente, se debe monitorizar este parámetro

en el aceite hidráulico con el propósito de determinar si existe o no ese tipo de fuga de un sistema a otro.

<i>Aceite</i>	<i>Contenido en H<sub>2</sub>O [% V/V]</i>
<i>H0</i>	0,00
<i>H03</i>	<0,10
<i>H05</i>	<0,10
<i>H08</i>	0,10

*Tabla 10 - Contenido en agua (en %V/V)*

El agua es un parámetro relacionado con el tiempo de uso del aceite y, como se aprecia en la Tabla 10, el aceite H08 es el más utilizado al tener la mayor cantidad de agua. Esto puede indicar que existe un paso o una comunicación entre el sistema refrigerante y el hidráulico.

## **6.7. Espectrometría infrarroja**

Mediante el análisis de espectro infrarrojo se puede obtener información acerca de varios parámetros de especial interés en los aceites hidráulicos: contenido de aditivos, oxidación, presencia de agua... Esta información puede poseer o presentar un carácter cualitativo (indicar o no la existencia de un determinado parámetro) o, en parte de ellos, ser capaz de cuantificarlos.

A continuación, se presenta la Tabla 11 con los resultados obtenidos mediante el tratamiento, por Transformada de Fourier, de los espectros infrarrojos de los aceites lubricantes. En esta tabla se hace especial énfasis en aquellos parámetros que son relevantes en los aceites hidráulicos, como lo son: los niveles de aditivos ZDDP, antioxidantes, antidesgaste, extrema presión, oxidación y agua.

<i>Parámetros</i>	<i>H0</i>	<i>H03</i>	<i>H05</i>	<i>H08</i>
<i>Ad. Antiox. Amínicos</i> [Abs.cm <sup>-1</sup> /0,1mm]	2,907	3,085	2,955	3,166
<i>Ad. Antidesgaste</i> [Abs.cm <sup>-1</sup> /0,1mm]	10,944	10,831	10,993	10,870
<i>Extrema Presión-1</i> [Abs.cm <sup>-1</sup> /0,1mm]	1,736	1,486	1,701	1,515
<i>Extrema Presión-2</i> [Abs.cm <sup>-1</sup> /0,1mm]	0,192	0,246	0,242	0,228
<i>Oxidación</i> [Abs.cm <sup>-1</sup> /0,1mm]	0,028	0,067	0,044	0,047
<i>H<sub>2</sub>O E2412</i> [ppm]	219,368	272,592	391,964	922,694
<i>ZDDP</i> [Abs.cm <sup>-1</sup> /0,1mm]	4,423	4,406	3,993	3,461

*Tabla 11 - Resultados de espectrometría infrarroja para aceites hidráulicos*

En la medición del agua, se aprecia un claro aumento de esta debido probablemente a una fuga de líquido refrigerante, tal y como se ha comentado en el apartado de contenido en agua.

El ZDDP debe decrecer con el uso del aceite debido a que se trata de un aditivo a base de zinc y fosforo. Como se muestra en los valores, el aceite H08 es el más utilizado debido a que presenta el valor de ZDDP más pequeño. Tomando como referencia el H0, se observaron caídas del nivel de aditivos presentes en el aceite, como se muestra en la Figura 22 al final del capítulo.

El valor de la medida de oxidación crece una vez se ha utilizado el aceite. Por otra parte, los parámetros de antioxidantes, antidesgaste y extrema presión se mantienen prácticamente constantes y oscilan ligeramente con respecto al valor original.

A continuación, se presenta en la Figura 19 el espectro infrarrojo del aceite nuevo de referencia.

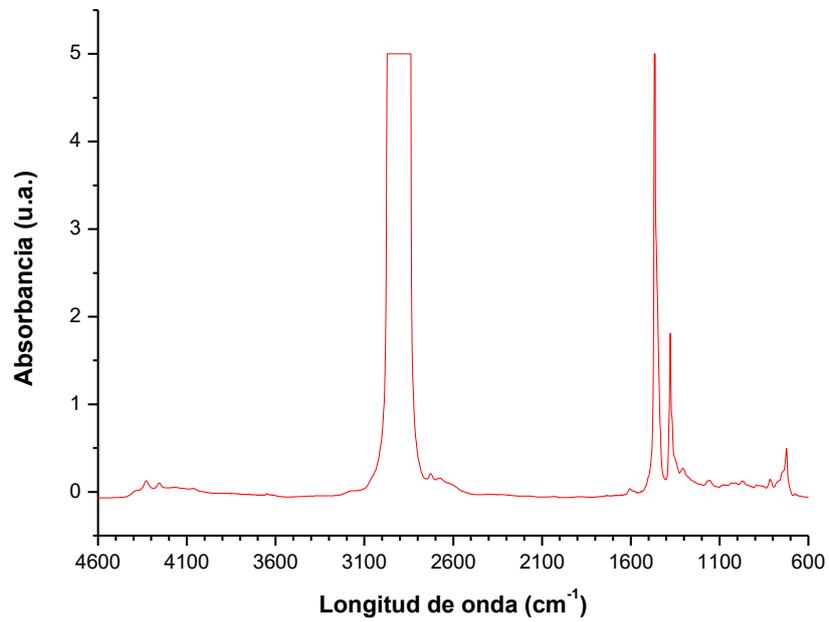


Figura 19 - Espectro infrarrojo aceite H0

Tras ello, se muestra la Figura 20 donde se observan los espectros infrarrojos de las muestras H03, H05 y H08 con sus respectivas diferencias.

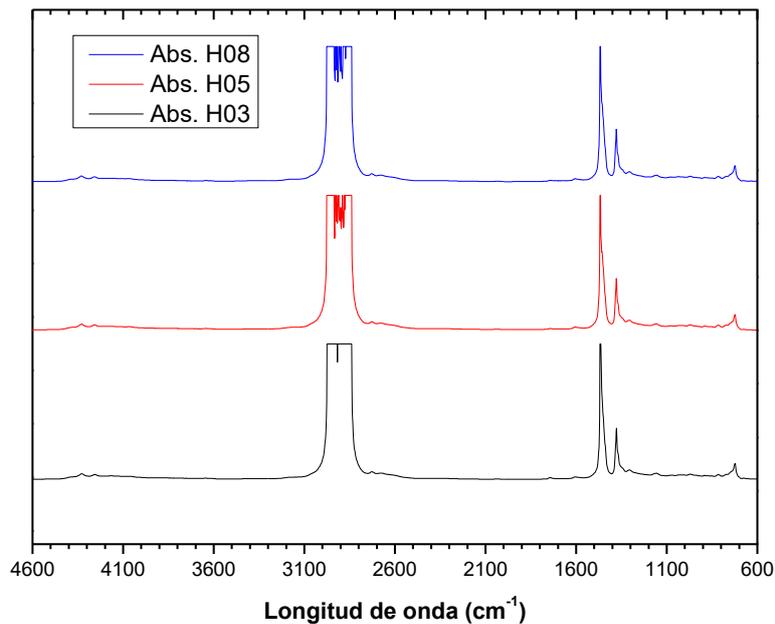


Figura 20 - Espectro infrarrojo de los aceites H03, H05 y H08

## 6.8. RULER

Mediante el RULER, podemos obtener el nivel de aditivos remanentes del aceite hidráulico. Como cabe de esperar, los aditivos se consumen con el tiempo y las horas de uso del aceite hidráulico, por lo que se podrá determinar cual está más usado o presenta unas condiciones de trabajo más exigentes, a partir del valor del índice RUL que presente. En la siguiente tabla, Tabla 12, se muestran los valores recogidos del análisis de las diferentes muestras de aceites hidráulicos.

<i>Aceite</i>	<i>Índice RUL [%]</i>
<i>H0</i>	100,00
<i>H03</i>	90,10
<i>H05</i>	88,24
<i>H08</i>	71,60

*Tabla 12 - Índice RUL (en %)*

Como se puede apreciar en la tabla, los aceites H03 y H05 poseen valores similares de aditivos, por lo que se considera que tienen las mismas horas de uso. Se puede llegar a esta conclusión dado que la procedencia de ambas es el mismo tipo de máquina: Negri Bossi 320. Por otra parte, el aceite H08 presenta una menor cantidad de aditivos pero, con un nivel correcto para un aceite hidráulico, aún no infringe ninguna de los requisitos estipulados. En comparación con los resultados de los aceites H03 y H05, parece ser que la Krauss Maffei 350 (de dónde procedía la muestra H08) exige más al aceite que no la Negri Bossi 320.

## 6.9. Contaje de partículas

El contaje de partículas mide el nivel de partículas que posee el fluido por cada mililitro. Además, divide las partículas contadas por tamaños, pudiendo determinar el código de limpieza ISO 4406. El primer dígito cuenta las partículas mayores de 4 micras

consideradas pequeñas, el segundo las mayores de 6 micras o medianas y, el tercero, las mayores de 14 micras, también llamadas grandes. En la Tabla 13 se pueden observar los valores obtenidos.

<i>Aceite</i>	<i>Código ISO 4406 [4µm/6µm/14µm]</i>
<i>H0</i>	26/23/15
<i>H03</i>	24/22/14
<i>H05</i>	23/21/14
<i>H08</i>	22/21/15

*Tabla 13 - Código de limpieza ISO 4406*

El código ISO debería presentar unos valores lo más bajos posibles (por ejemplo 13/13/13) para un aceite hidráulico nuevo e ir aumentando conforme se va utilizando éste y va acumulando partículas de desgaste. En los resultados obtenidos en la Tabla 13 se aprecia que el aceite nuevo, según el código ISO obtenido, se podría catalogar como “sucio”, hecho que no debería ocurrir dado que el nivel obtenido se correspondería con una muestra de aceite con una concentración tal de partículas que, a simple vista, podrían apreciarse como pequeñas partículas metálicas. Además, si se analizan los aceites hidráulicos usados, H03, H05 y H08, estos tres presentan niveles de limpieza más bajos que el nuevo. Según los datos obtenidos, cabe esperar que existe alguna entrada de contaminación proveniente del equipo de medición. El único foco posible es la bomba de engranajes que suministra de muestra al sensor, por lo que en un futuro sería conveniente estudiar una alternativa a este sistema dónde el fluido a analizar evite entrar en contacto con elementos metálicos para así evitar interferencias en las lecturas del código de limpieza.

## **6.10. ICP-OES**

Tras realizar el análisis de las muestras de aceite hidráulico por espectroscopia de plasma acoplado, se ha podido confeccionar una tabla, Tabla 14, dónde se plasman la concentración de los diferentes metales que se ha detectado.

<i>Elemento [ppm]</i>	<i>H0</i>	<i>H03</i>	<i>H05</i>	<i>H08</i>
<i>Ag [ppm]</i>	1	<1	<1	<1
<i>Al [ppm]</i>	1	1	<1	1
<i>B [ppm]</i>	2	12	10	35
<i>Ba [ppm]</i>	1	1	1	<1
<i>Ca [ppm]</i>	57	110	98	59
<i>Cd [ppm]</i>	1	<1	<1	<1
<i>Cr [ppm]</i>	1	<1	<1	3
<i>Cu [ppm]</i>	1	4	4	10
<i>Fe [ppm]</i>	1	13	22	12
<i>Mg [ppm]</i>	3	2	2	3
<i>Mn [ppm]</i>	1	<1	<1	<1
<i>Mo [ppm]</i>	1	<1	<1	<1
<i>Na [ppm]</i>	4	3	3	3
<i>Ni [ppm]</i>	1	<1	<1	<1
<i>P [ppm]</i>	364	372	346	331
<i>Pb [ppm]</i>	1	<1	<1	<1
<i>Si [ppm]</i>	2	37	20	25
<i>Sn [ppm]</i>	1	1	<1	<1
<i>Ti [ppm]</i>	1	<1	<1	<1
<i>V [ppm]</i>	1	<1	<1	<1
<i>Zn [ppm]</i>	444	424	386	293

*Tabla 14 - Resultados espectrometría ICP-OES para aceites hidráulicos*

El valor de silicio aumenta considerablemente debido a que es el principal componente del polvo y este tipo de máquinas poseen un cárter sin presurizar en contacto con la atmósfera.

Tanto el hierro como el cobre aumentan debido al desgaste de las juntas y las electroválvulas de la máquina y la aparición de partículas en el aceite.

El boro, al ser un aditivo del aceite, por lo que su normal evolución mediante el uso del aceite es su consumo (diminución de su concentración). Pero, el boro además, también se emplea como aditivación en líquidos refrigerantes, por lo que si se observa un incremento de la concentración de boro en el aceite hidráulico sería una señal indicativa de contaminación del aceite por un problema del sistema de refrigeración. Por lo que, según los datos de la Tabla 14, se puede considerar una posible fuga de líquido refrigerante en el aceite hidráulico. Este hecho también se aprecia en las medidas realizadas de contenido en agua y FT-IR (ver Tabla 11).

Según lo descrito en el apartado 3.5 del estudio, el ZDDP es uno de los aditivos característicos presentes en la gran mayoría de aceites hidráulicos. Por consiguiente, se analizó tanto los niveles de zinc y fósforo mediante ICP-OES como el propio ZDDP por FT-IR y mediante RULER. Los valores de ambos elementos, zinc y fósforo, por ICP-OES decrecen en relación al valor inicial que presenta la muestra H0. Este decrecimiento es proporcional a los obtenidos en los equipos de FT-IR y RULER, tal y como se puede observar en la Figura 21, la Figura 22 y la Figura 23.

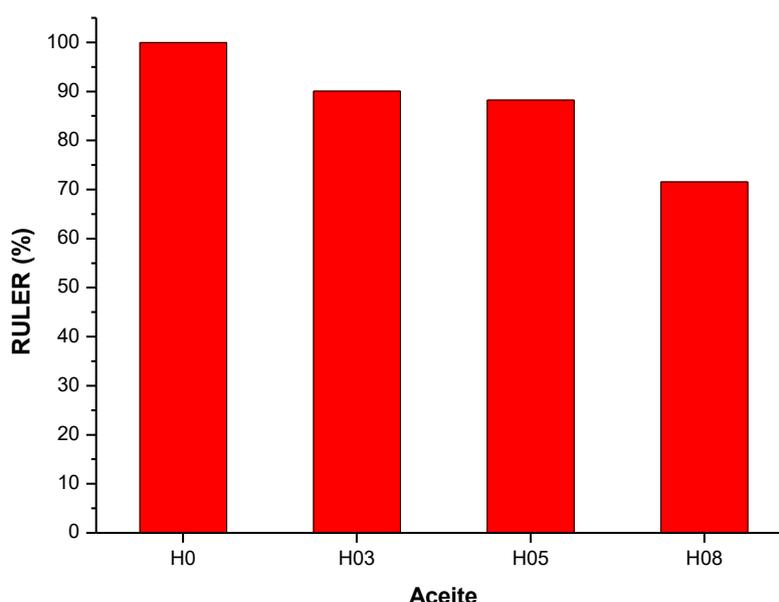


Figura 21 - Índice RUL en los aceites H0, H03, H05 y H08

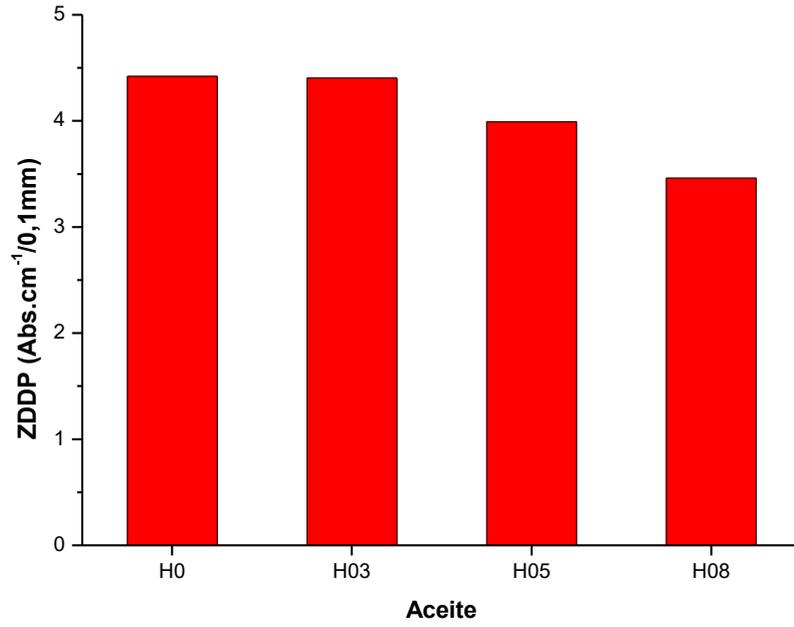


Figura 22 - Aditivo ZDDP medido por FT-IR en aceites H0, H03, H05 y H08

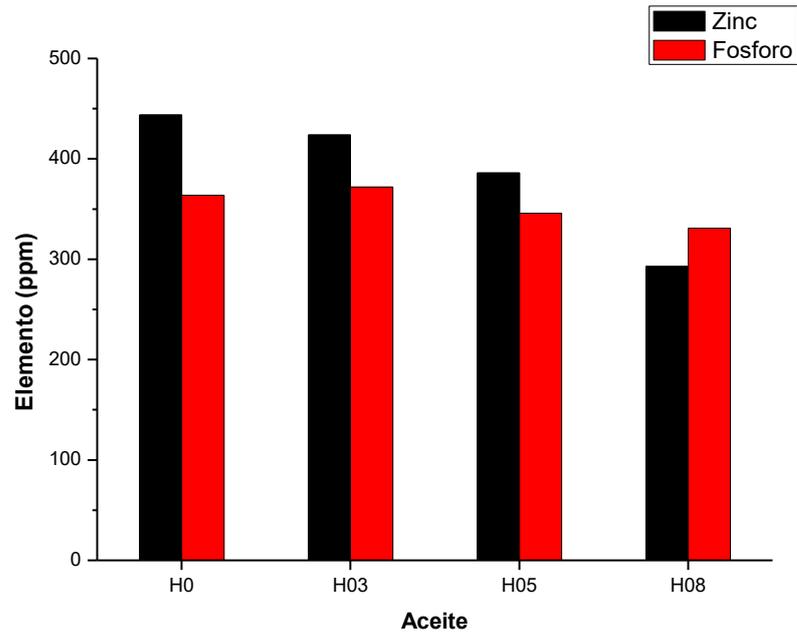


Figura 23 - Zinc y Fósforo (en ppm) en aceites H0, H03, H05 y H08

# 7.RESULTADOS DE LOS LÍQUIDOS REFRIGERANTES

## 7.1. Nomenclatura

### 7.1.1. Muestras

Para realizar el estudio de los líquidos refrigerantes se le ha asignado un nombre a cada una de las muestras. El nombre está basado principalmente en el espécimen, pero además se muestran características como el número de máquina, la máquina y el refrigerante, mostrados en la Tabla 15. El refrigerante nuevo es de la marca Winner Lubricantes de alta calidad, siendo el producto concentrado.

<i>Nomenclatura</i>	<i>Especimen</i>	<i>Número de máquina</i>	<i>Máquina</i>	<i>Refrigerante</i>
R0	R0	-	-	UNE 26-361-88
R1	R1	71	BMB 850	Cierre
R2	R2	69	BMB 1150	Cierre
R3	R3	69	BMB 1150	Carro
R4	R4	24	BMB 1700	Carro
R5	R5	14	BMB 700	Carro
R6	R6	20	BMB 450	Carro
R7	R7	20	BMB 450	Cierre
R8	R8	24	BMB 1700	Cierre
R9	R9	14	BMB 700	Cierre
R10	R10	70	BMB 1150	Carro
R11	R11	71	BMB 850	Carro
R12	R12	70	BMB 1150	Cierre

Tabla 15 - Nomenclatura de los líquidos refrigerantes

La ficha técnica propia del refrigerante nuevo se indica en la Tabla 16. La Tabla 17 muestra la temperatura de congelación del refrigerante en función de la concentración de anticongelante añadida.

<i>Parámetro</i>	<i>Método</i>	<i>Resultado</i>
<i>Densidad a 20 °C [g/cm<sup>3</sup>]</i>	ASTM D4052	1,12
<i>Punto de Congelación [°C]</i>	ASTM D1177	Según tabla de disoluciones
<i>pH (al 50% V/V)</i>	ASTM D1287	8,3

Tabla 16 - Ficha de seguridad líquido refrigerante Winner Lubricantes de alta calidad concentrado

<i>Concentración de Anticongelante [% V/V]</i>	<i>Temperatura de congelación [°C]</i>
50% en H <sub>2</sub> O	-37,0
33% en H <sub>2</sub> O	-19,0
25% en H <sub>2</sub> O	-13,0
20% en H <sub>2</sub> O	-9,5

Tabla 17 - Temperatura de congelación en función de la concentración de anticongelante

### 7.1.2. Patrones para la calibración de equipos

Para la correcta calibración de los equipos de medida empleados se ha utilizado una serie de patrones creados a partir de su porcentaje en masa. Estos patrones se componen de una disolución de agua y etilenglicol como se observa en la Tabla 18. A partir de ellos, se realizan rectas de calibrado de los diferentes equipos para poder obtener concentraciones de agua y etilenglicol de las diferentes muestras.

Nombre	Agua (%m/m)	Etilenglicol (%m/m)
H2O milli Q	100,00	0,00
1	88,98	11,02
2	78,20	21,80
3	67,68	32,32
4	57,35	42,65
5	47,28	52,72
6	42,32	57,68
7	37,39	62,61
8	32,56	67,44
9	27,77	72,23
10	23,01	76,99
11	18,32	81,68
12	13,65	86,35
13	9,08	90,92
14	4,55	95,45
15	2,69	97,31
16	0,90	99,10
Etilenglicol	0,00	100,00

Tabla 18 - Concentración de agua y etilenglicol (en %m/m) de los patrones

## 7.2. Densidad

La densidad es un parámetro ampliamente relacionado con la concentración de etilenglicol debido a la diferencia de densidades de ambos fluidos. Conociendo los

valores de densidad del agua ( $0,99829 \text{ g/cm}^3$  a  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ) y del etilenglicol ( $1,11 \text{ g/cm}^3$  a  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ), se puede estimar el porcentaje de etilenglicol en una primera aproximación.

Mediante la Tabla 19 se calcula la densidad teórica de las disoluciones de los patrones y la densidad experimental a  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ .

<i>Patrón</i>	<i>Densidad teórica [g/cm<sup>3</sup>]</i>	<i>Densidad experimental [g/cm<sup>3</sup>]</i>
<i>H<sub>2</sub>O milli Q</i>	0,99919	1,01030
1	1,00980	1,00981
2	1,02133	1,03031
3	1,03283	1,04792
4	1,04438	1,05032
5	1,05588	1,06697
6	1,06165	1,07032
7	1,06744	1,08602
8	1,07317	1,09033
9	1,07892	1,09555
10	1,08470	1,09033
11	1,09044	1,10508
12	1,09623	1,11033
13	1,10195	1,10508
14	1,10769	1,11033
15	1,11005	1,11460
16	1,11235	1,11033
<i>Etilenglicol</i>	-	1,12413

Tabla 19 - Densidad teórica y experimental (en  $\text{g/cm}^3$ ) de los patrones

A continuación, se relacionan estas densidades con el porcentaje de etilenglicol de los patrones dando como resultado los gráficos de densidad teórica y la densidad experimental (Figura 24 y Figura 25).

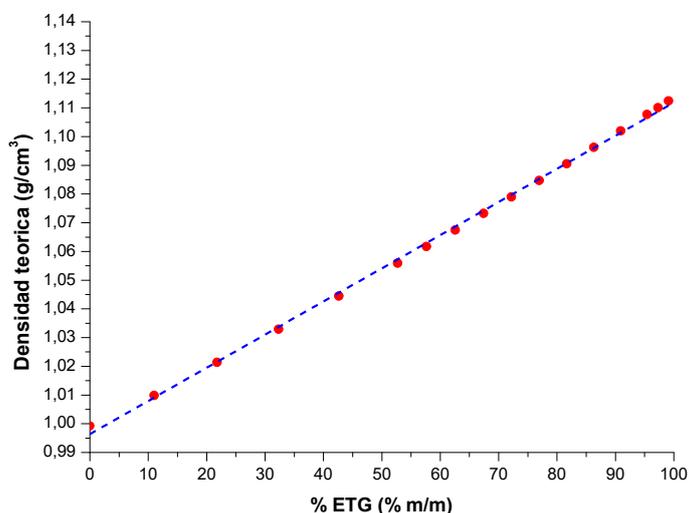


Figura 24 - Densidad teórica (en g/cm³) frente a concentración de etilenglicol (en %m/m) de los patrones

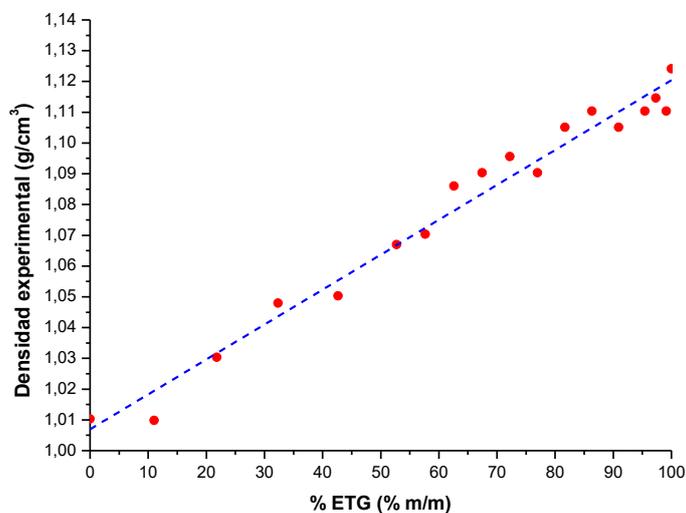


Figura 25 - Densidad experimental (en g/cm³) frente a concentración de etilenglicol (en %m/m) de los patrones

Tras ello, mediante la ecuación [4] y la ecuación [5] proporcionada por la Figura 24 y la Figura 25, se calcula el porcentaje de etilenglicol teórico de las muestras y se compara el resultado con el porcentaje de etilenglicol experimental como se muestra en la Tabla 20.

$$\rho_T = 0,00115 * \%ETG + 0,99633 \quad [4]$$

Donde:

$\rho_T$ , es la densidad teórica (en g/cm<sup>3</sup>).

$\%ETG$ , es la concentración de etilenglicol (en %m/m).

$$\rho_E = 0,00113 * \%ETG + 1,00694 \quad [5]$$

Donde:

$\rho_E$ , es la densidad experimental (en g/cm<sup>3</sup>).

$\%ETG$ , es la concentración de etilenglicol (en %m/m).

<i>Muestra</i>	<i>% Etilenglicol teórico [%m/m]</i>	<i>%Etilenglicol experimental [%m/m]</i>
R0	78,33	75,82
R1	43,00	37,27
R2	36,67	30,36
R3	43,00	37,27
R4	61,67	57,64
R5	43,00	37,37
R6	45,00	39,45
R7	35,08	28,64
R8	61,67	57,64
R9	43,00	37,27
R10	61,67	57,64
R11	43,00	37,37

Tabla 20 - Concentración de etilenglicol teórica y experimental (en %m/m) de las muestras de líquidos refrigerantes

Debido a la degradación que sufren las muestras, no se puede considerar resolutivo el resultado obtenido, por lo que se procede a medir el pH para observar alguna tendencia razonable e interpretable.

### 7.3. Medida del pH

El pH es un indicador de la acidificación que muestra un fluido. En este caso, las muestras presentan unos valores de pH que se pueden relacionar con el grado de uso, ya que el valor de pH del líquido refrigerante original es el más alto (más básico) de todo. A partir de ello, el resto de los valores de las muestras usadas son más ácidos como se muestra en la Tabla 21.

<i>Muestra</i>	<i>pH</i>	<i>Muestra</i>	<i>pH</i>
<i>R0</i>	8,15	<i>R6</i>	5,89
<i>R1</i>	5,57	<i>R7</i>	5,85
<i>R2</i>	6,75	<i>R8</i>	5,88
<i>R3</i>	7,27	<i>R9</i>	7,57
<i>R4</i>	6,63	<i>R10</i>	7,10
<i>R5</i>	7,79	<i>R11</i>	6,84
<i>R6</i>	5,89	<i>R12</i>	7,80

Tabla 21 - Valor del pH de las muestras de líquidos refrigerantes

A la vista de los resultados, no se puede extraer una conclusión clara sobre el estado de los refrigerantes por lo que se opta por realizar dos ensayos: uno focalizado en la cuantificación del agua y otro para la cuantificación del etilenglicol. Estos ensayos, aunque se realicen de manera separada, deberán plasmar resultados coherentes para poder así calificarlos como válidos para el sistema agua-etilenglicol. El etilenglicol se determina por refractometría, mientras que el agua por espectrometría infrarroja.

## 7.4. Refractometría

Mediante la técnica de refractometría se puede relacionar rápidamente la cantidad de etilenglicol en una disolución realizando de esta manera una cuantificación más completa que mediante la densidad y el pH. Para ello, se utiliza un refractómetro de grados Brix y los patrones realizados previamente.

En primer lugar, mediante la Tabla 22 se relacionan los grados Brix con el porcentaje de etilenglicol de los patrones. Se han utilizado dos refractómetros de la misma marca y modelo en los cuales uno mide entre 0 y 32 grados Brix, mientras que el otro mide entre 28 y 62 grados Brix. No obstante, en ambos la escala se encuentra gradada en saltos de 0,2 grados, por lo que el error de lectura que se pueda cometer en uno u otro equipo son el mismo.

<i>Patrón</i>	<i>Grados BRIX [°Brix]</i>	<i>Patrón</i>	<i>Grados BRIX [°Brix]</i>
1	7,4 <sup>(a)</sup>	9	41,0 <sup>(b)</sup>
2	13,8 <sup>(a)</sup>	10	43,2 <sup>(b)</sup>
3	20,0 <sup>(a)</sup>	11	45,4 <sup>(b)</sup>
4	25,8 <sup>(a)</sup>	12	47,6 <sup>(b)</sup>
5	31,4 <sup>(a)</sup> / 31,6 <sup>(b)</sup>	13	49,4 <sup>(b)</sup>
6	34,0 <sup>(b)</sup>	14	51,2 <sup>(b)</sup>
7	36,2 <sup>(b)</sup>	15	51,8 <sup>(b)</sup>
8	38,6 <sup>(b)</sup>	16	52,4 <sup>(b)</sup>

*Tabla 22 - Refractometría (en °Brix) de los patrones. Los marcados mediante <sup>(a)</sup>, son los patrones analizados mediante el refractómetro de rango 0-32°Brix, mientras que los valores marcados con <sup>(b)</sup> son los analizados con el refractómetro de rango 28-62 °Brix*

En segundo lugar, se realiza una correlación, mostrada en la Figura 26, entre los grados Brix que proporcionan los dos refractómetros empleados y el porcentaje de etilenglicol de los patrones que se han preparado, dando como resultado una respuesta

lineal (tal y como se aprecia en la Figura 26) de la cual se ha extraído una ecuación empírica que permitirá la obtención del contenido de etilenglicol de las muestras [6].

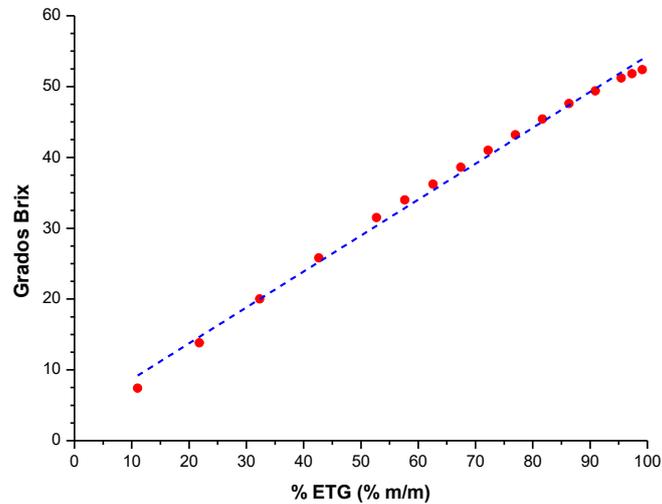


Figura 26 - Grados Brix frente a concentración (en %m/m) de los patrones

$$\text{Grados Brix} = 0,50724 * \%ETG + 3,59806 \quad [6]$$

Donde:

*Grados Brix*, son los grados Brix del fluido.

*%ETG*, es la concentración de etilenglicol (en %m/m).

Por último, mediante la ecuación de la recta de calibrado obtenida al realizar las mediciones de los 16 patrones agua-etilenglicol, se ha podido obtener el valor de la concentración de etilenglicol que pretendían las muestras de refrigerante. Los resultados, en grados Brix, del análisis mediante los refractómetros de la batería de muestras se encuentran plasmadas en la Tabla 23, dónde además se han traducido los grados Brix en concentración de etilenglicol en unidades de porcentaje másico.

<i>Muestra</i>	<i>ºBrix</i>	<i>Conc. Etilenglicol [%m/m]</i>
R0	39,2	70,19
R1	53,4	98,19
R2	53	97,40
R3	53,6	98,58
R4	52,8	97,01
R5	53,2	97,80
R6	53,8	98,98
R7	53	97,40
R8	47	85,57
R9	53,6	98,58
R10	52,8	97,01
R11	53	97,40
R12	52,4	96,22

*Tabla 23 - Grados Brix y concentración (en %m/m) de las muestras de líquidos refrigerantes*

## **7.5. Espectrometría infrarroja**

Al igual que con los aceites hidráulicos, la espectrometría infrarroja proporciona mucha información con muy poco volumen de muestra. En este caso, se puede determinar el porcentaje de agua presente en la muestra a partir de su absorbancia. Es preferible cuantificar el agua porque ésta enmascara la cantidad de etilenglicol presente debido a que ambas tienen grupos -O-H.

Para ello, se obtienen los espectros infrarrojos de los patrones representados en la Figura 27. Tras observarlo, se determina que el rango de longitudes de onda más importante para conocer la absorbancia del agua y del etilenglicol es entre 1800 y 2800

$\text{cm}^{-1}$ , representado en la Figura 28, habiendo un punto isobéptico a partir del cual se invierten las tendencias.

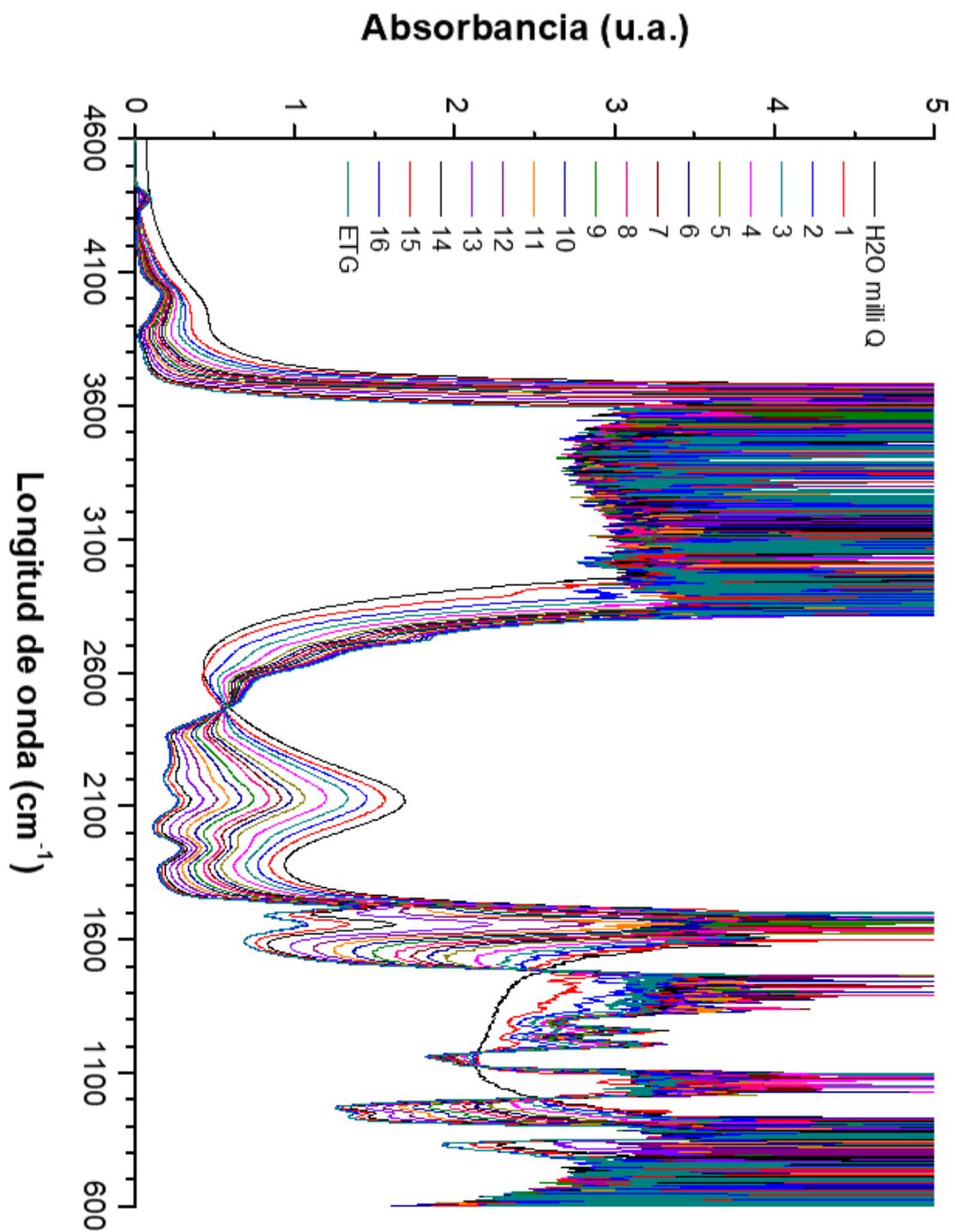


Figura 27 - Espectro infrarrojo de los patrones

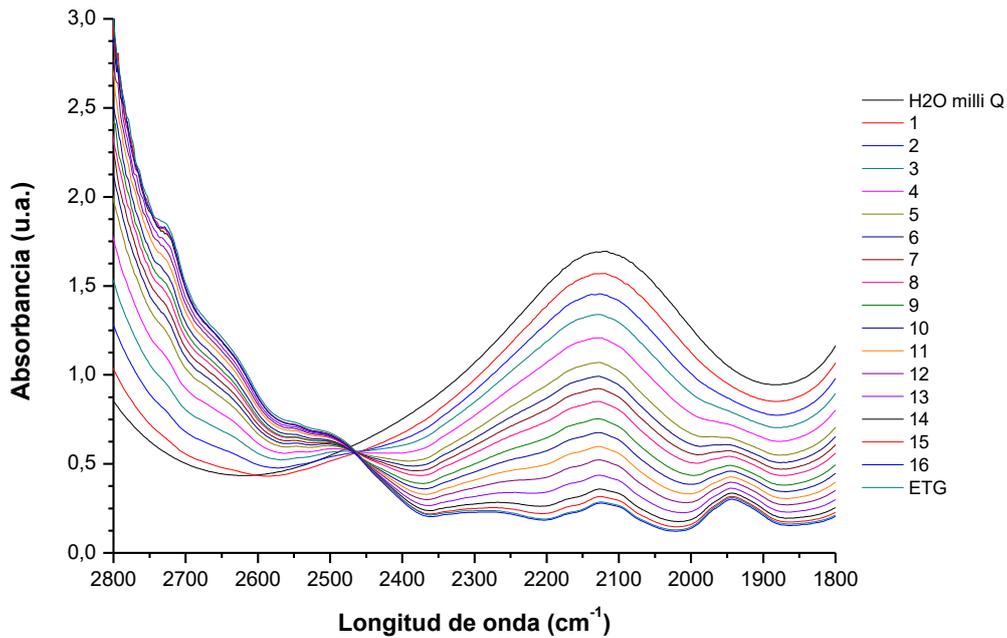
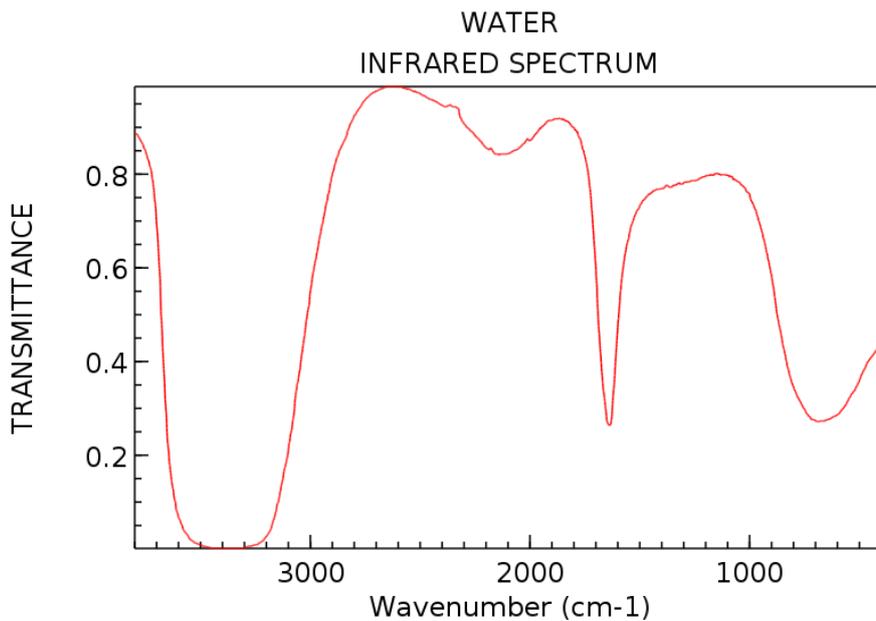


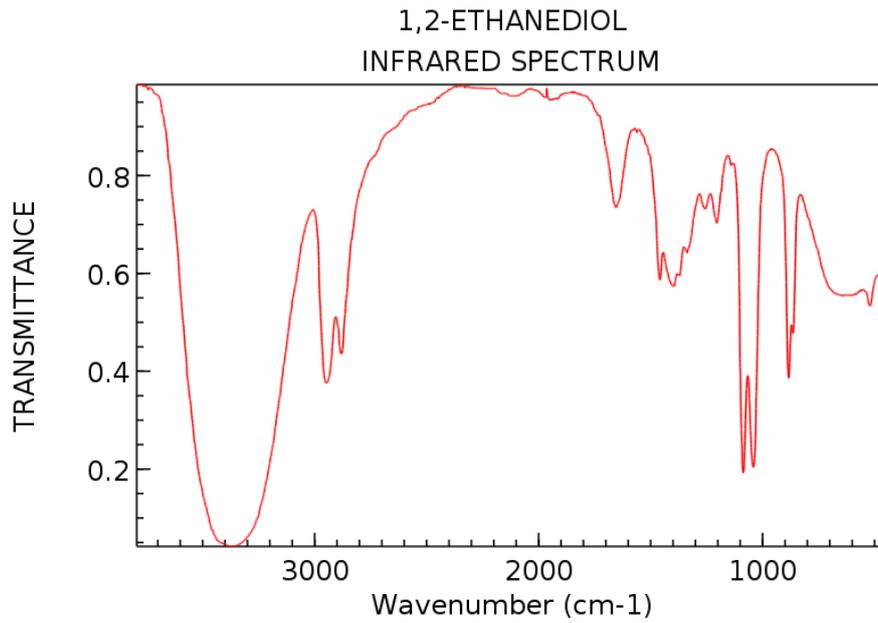
Figura 28 - Espectro infrarrojo ampliado entre 2800 y 1800  $\text{cm}^{-1}$

A su vez, mediante la Figura 29 y la Figura 30 del NIST Chemistry WebBook, se observa que el agua se cuantifica a una longitud de onda de  $2148 \text{ cm}^{-1}$  y el etilenglicol a una longitud de onda de  $2728 \text{ cm}^{-1}$ . Ambas figuras representan la transmitancia, la cual es la inversa de la absorbancia.



NIST Chemistry WebBook (<https://webbook.nist.gov/chemistry>)

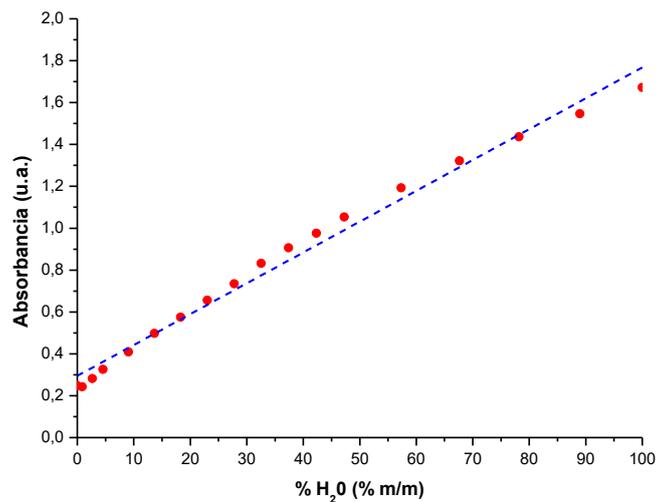
Figura 29 - Transmitancia frente a número de onda (en  $\text{cm}^{-1}$ ) del agua



NIST Chemistry WebBook (<https://webbook.nist.gov/chemistry>)

*Figura 30 - Transmitancia frente a número de onda (en  $\text{cm}^{-1}$ ) del etilenglicol*

Seguidamente, se muestra en la Figura 31 y la Figura 32 una recta de calibrado que relaciona la absorbancia de cada uno de los fluidos de los patrones con su concentración en la disolución. Se obtiene una ecuación para cada uno de los fluidos a partir de sus rectas.



*Figura 31 - Absorbancia frente a concentración de agua (en %m/m) en los patrones*

$$\text{Absorbancia} = 0,01473 * \%H_2O + 0,29486 \quad [7]$$

Donde:

*Absorbancia*, es la absorbancia del agua (en u.a.).

*%H<sub>2</sub>O*, es la concentración de agua (en %m/m).

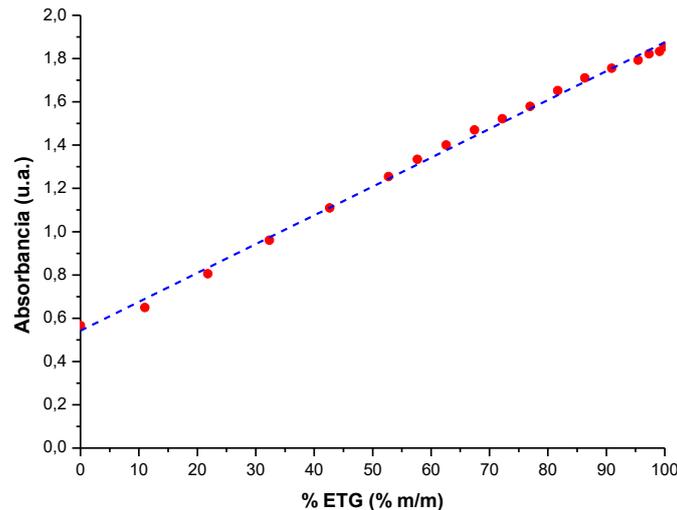


Figura 32 - Absorbancia frente a concentración de etilenglicol (en %m/m) en los patrones

$$\text{Absorbancia} = 0,01333 * \%ETG + 0,54224 \quad [8]$$

Donde:

*Absorbancia*, es la absorbancia del etilenglicol (en u.a.).

*%ETG*, es la concentración de etilenglicol (en %m/m).

Tras ello, se calcula el porcentaje de agua presente en las muestras tomando como número de onda aquella dónde la banda de absorción del agua presenta un máximo, es decir, a  $2148 \text{ cm}^{-1}$ . Por lo que, a partir de las absorbancias que muestran las muestras en esa concreta región del espectro infrarrojo y haciendo uso de la ecuación empírica generada a partir del análisis de los espectros de infrarrojo de los diferentes patrones, se pueden obtener las siguientes concentraciones de agua (ver Tabla 24):

<i>Muestra</i>	<i>Absorbancia H<sub>2</sub>O</i>	<i>Conc. H<sub>2</sub>O [%m/m]</i>
R0	0,870	39,134
R1	0,210	n.d.
R2	0,214	n.d.
R3	0,180	n.d.
R4	0,291	n.d.
R5	0,240	n.d.
R6	0,164	n.d.
R7	0,236	n.d.
R8	0,606	21,145
R9	0,209	n.d.
R10	0,249	n.d.
R11	0,178	n.d.
R12	0,257	n.d.

*Tabla 24 - Concentración de agua (en %m/m) de las muestras de los líquidos refrigerantes (n.d.: no detectable)*

Finalmente, se relaciona el porcentaje de etilenglicol obtenido mediante la técnica de refractometría y el porcentaje de agua obtenido por espectrometría infrarroja mostrados en la tabla anterior (Tabla 24). Como se puede observar, ambas técnicas proporcionan resultados complementarios, es decir, al tratarse de una mezcla binaria (agua- etilenglicol), la suma de las concentraciones máxicas extraídas de ambos elementos debe ser, en la medida de lo posible, igual a la totalidad de la mezcla (el100%). No obstante, se pueden observar desviaciones o resultados que a simple vista pueden resultar erróneos, pero hay que tener en cuenta que, dado que las leyes empíricas extraídas siempre presenta una cierta incertidumbre relacionada con la sensibilidad (en la refractometría la escala que prestaban los refractómetros era de 0,2 °Brix, mientras que el espectroscopia infrarroja, el grado de resolución era del 0,001 de absorbancia) de las mismas, es posible que dichas pequeñas variaciones al contrastar

una técnica con otra provoquen esos resultado algo discrepantes. A pesar de ello, teniendo en perspectiva lo expuesto, los resultados obtenidos son buenos y comparables entre sí.

## **8.PLAN DE MANTENIMIENTO**

Para realizar un correcto plan de mantenimiento predictivo de los sistemas es necesario basarse principalmente en los siguientes aspectos.

En primer lugar, mientras la garantía este vigente, se deben cumplir los plazos propuestos por el fabricante. En el caso de los fabricantes Negri Bossi y Krauss Maffei, estipulan el cambio del aceite hidráulico cada 6 meses.

En segundo lugar, es necesario considerar el funcionamiento de las máquinas. Las máquinas de inyección de plástico estudiadas trabajan durante 16 horas diarias con una alta productividad pero con unos materiales no muy agresivos a no muy alta temperatura. Tras conocer las características anteriores, se considera que las máquinas en cuestión no trabajan en condiciones muy severas ni están sometidas a esfuerzos excesivos.

En tercer lugar, se debe establecer un periodo de muestreo acorde al funcionamiento de las máquinas y guiándose inicialmente por las recomendaciones del fabricante. Durante el periodo de garantía, se realizan muestreos cada 2 meses para obtener información del estado del aceite en ese transcurso de tiempo. Una vez finalizada la garantía de la máquina, y con la experiencia de los análisis previos, se reajusta la frecuencia de los muestreos en función de los resultados obtenidos. Adicionalmente, en función de los resultados obtenidos en los muestreos previos y el estado del aceite en el momento del cambio, se puede estudiar la ampliación del periodo de cambio si el aceite está en buen estado tras 6 meses para optimizar la vida útil del fluido y los costes de mantenimiento.

En último lugar, la frecuencia de toma de muestras está determinada por la variación de los parámetros más importantes del fluido. En el caso de los aceites hidráulicos, los parámetros más importantes son la viscosidad y el conteo de partículas. Además, se debe tener en cuenta parámetros como el nivel de aditivos remanente en el aceite o la oxidación del mismo. Por otra parte, el parámetro más importante para

caracterizar en los fluidos refrigerantes es la concentración de anticongelante (etilenglicol) o de agua en su defecto.

## **9. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS**

### **9.1. Conclusiones**

La importancia del mantenimiento predictivo en constante auge obliga a las empresas a diseñar su propio plan de mantenimiento para reducir los costes asociados al mismo sin perder características como la seguridad o la fiabilidad.

Este trabajo se ha basado en la monitorización del sistema hidráulico y del sistema de refrigeración de las máquinas de inyección de plástico, pudiendo extraer las siguientes conclusiones generales:

- Se ha realizado satisfactoriamente una ruta analítica con la que se ha podido caracterizar correctamente tanto los aceites hidráulicos como los líquidos refrigerantes.

Se determina que para la caracterización de aceites hidráulicos se deben realizar los ensayos de viscosidad, espectrometría infrarroja, RULER, contaje de partículas y espectrometría ICP-OES. Mientras que para la caracterización de los líquidos refrigerantes es necesario realizar los ensayos de refractometría y espectrometría infrarroja.

- Basándose en los parámetros más importantes de los fluidos, se ha diseñado un plan de mantenimiento predictivo que regula los tiempos de muestreo analizando el estado del fluido para alargar la vida útil del mismo sin comprometer la integridad de la máquina ni su rendimiento.

Además de las conclusiones generales descritas anteriormente, se han extraído una serie de conclusiones particulares:

- El aceite H08 se encuentra en un estado de excesiva contaminación y degradación. Estas características se pueden observar a través de su bajo nivel

de aditivos, su gran concentración de partículas y su contenido de agua. Es posible, que la máquina Krauss Mafei 350 esté trabajando en unas condiciones fuera de las estipuladas por el fabricante (alta exigencia o tiene un problema en el sistema de refrigeración, lo cual deriva en una degradación severa de su aceite hidráulico.

- Los aceites H03 y H05, que se encuentran en condiciones muy semejantes, tienen niveles de contaminación y degradación aceptables. Los aditivos han disminuido ligeramente, no se encuentra un excesivo contenido de agua y no presentan una elevada cantidad de partículas. Se puede concluir que no existe ninguna alarma por el mal estado o mal funcionamiento de las máquinas de inyección de plástico Negri Bossi.
- Todos los líquidos refrigerantes, menos el R8, presentan una concentración muy elevada de etilenglicol, cercana al 100%. El refrigerante R8 presenta también mayor concentración de etilenglicol que el refrigerante nuevo R0, pero menor que la del resto de fluidos. Al desconocer la procedencia de las muestras de refrigerante, no se pueden correlacionar el efecto de la pérdida de capacidad térmica (proporcionada por la porción de agua de la mezcla). Solamente es posible establecer que, el etilenglicol es incorporado al sistema de refrigeración para aumentar la temperatura de ebullición del agua, pero a la vista de los resultados, sería conveniente revisar las proporciones agua-etilenglicol empleadas en los sistemas de refrigeración, dado que a la vista de los resultados, 12 de las 13 muestras habían perdido la totalidad del agua.

## 9.2. Trabajos futuros

Dentro de los futuros trabajos posibles, es destacable mencionar los siguientes:

- Caracterización de un aceite hidráulico mediante el conteo de partículas realizado por diferentes equipos. Al efectuar el análisis mediante diversos equipos, se puede realizar un contranálisis capaz de optimizar la técnica para una correcta utilización.
- Realizar una búsqueda de nuevas metodologías para poder analizar los líquidos refrigerantes. Actualmente no se han desarrollado muchas técnicas y sería recomendable realizar una evaluación más severa de estos fluidos.

- Aplicación del plan de mantenimiento para comprobar su efectividad y poder, de esta manera, realizar las correcciones correspondientes para optimizarlo.

## 10. BIBLIOGRAFÍA

- [1]. Beltrán-Rico, M., & Marcilla-Gomis, A. (2012). Tecnología de polímeros. Publicaciones Universidad de Alicante, Alicante, ISBN, 978-84.
- [2]. Inyección de materiales plásticos y máquinas de inyección, <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/06/inyeccion-de-materiales-plasticos-i.html>.
- [3]. Plan de mantenimiento para una máquina de inyección Negri Bossi con enfoque de análisis de riesgos. Barrera Mancilla, AA., Hernández Acosta, MA. (2015). Instituto Politécnico Nacional. <https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/13881/Tesis%20Barrera-Hernandez.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [4]. Procesos de Conformación de Plásticos, <http://procesosdemanufacturaepoch.blogspot.com/2013/>
- [5]. Plan de mantenimiento para una máquina de inyección Negri Bossi con enfoque de análisis de riesgos. Barrera Mancilla, AA. Hernández Acosta, MA. (2015). Plan de mantenimiento para una máquina de inyección Negri Bossi con enfoque de análisis de riesgos.
- [6]. Inyectoras de plástico – Sistema hidráulico, <http://www.hidraulicapractica.com/es/industrial/inyectoras-de-plastico-sistema-hidraulico>
- [7]. Enfriamiento de máquinas y de procesos, <http://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/5113-Enfriamiento-de-maquinas-y-de-procesos.html>
- [8]. Miller, R. W. (1993). Lubricants and their applications. McGraw-Hill.
- [9]. Rudnick, L. R. (2017). Lubricant additives: chemistry and applications. CRC press.
- [10]. Macián, V., Tormos, B., Peidró, J., & Olmeda, P. (2002). Mantenimiento de motores Diesel. Editorial de la UPV, Valencia.
- [11]. Martínez, B. T. (2005). Diagnóstico de motores diésel mediante el análisis del aceite usado. Reverté.
- [12]. ASTM D8045-17 Standard Test Method for Acid Number of Crude Oils and Petroleum Products by Catalytic Thermometric Titration, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017, <https://doi.org/10.1520/D8045-17>
- [13]. Application Bulletin 405/2 EN: Determination of the total base number in petroleum products, <https://www.metrohm.com/en/applications/AB-405>
- [14]. Estudio del comportamiento y de la influencia en el desgaste de los aceites lubricantes de baja viscosidad en MCI. Miró Mezquita, G. (2017). [Tesis doctoral no publicada]. Universitat Politècnica de València. doi:10.4995/Thesis/10251/78615. <http://hdl.handle.net/10251/78615>
- [15]. Gómez Estrada, YA. (2013). Contribución al desarrollo y mejora para la cuantificación de la degradación en aceites lubricantes usados de MCI a través de la técnica de espectrometría infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR)

- [Tesis doctoral no publicada]. Universitat Politècnica de València. doi:10.4995/Thesis/10251/19244. <http://hdl.handle.net/10251/19244>
- [16]. ISO 4406:2017 Hydraulic fluid power -- Fluids -- Method for coding the level of contamination by solid particles, 2017-08-08/Vigente, ISO/TC 131/SC 6 – Contamination control
- [17]. Montoro Moreno, L. (2005). Contribución al desarrollo y mejora de técnicas para la detección y análisis de partículas metálicas y contaminantes en aceites lubricantes usados [Tesis doctoral no publicada]. Universitat Politècnica de València. doi:10.4995/Thesis/10251/1875. <http://hdl.handle.net/10251/1875>
- [18]. ASTM D1298-12b(2017) Standard Test Method for Density, Relative Density, or API Gravity of Crude Petroleum and Liquid Petroleum Products by Hydrometer Method, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017, <https://doi.org/10.1520/D1298-12BR17>
- [19]. ASTM D1217-15 Standard Test Method for Density and Relative Density (Specific Gravity) of Liquids by Bingham Pycnometer, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015, <https://doi.org/10.1520/D1217-15>
- [20]. Contribución al desarrollo y mejora para la cuantificación de la degradación en aceites lubricantes usados de MCI A a través de la técnica de espectrometría infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR)
- [21]. ASTM E2412-10(2018) Standard Practice for Condition Monitoring of In-Service Lubricants by Trend Analysis Using Fourier Transform Infrared (FT-IR) Spectrometry, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018, <https://doi.org/10.1520/E2412-10R18>
- [22]. ASTM D7214-07a(2012) Standard Test Method for Determination of the Oxidation of Used Lubricants by FT-IR Using Peak Area Increase Calculation, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012, <https://doi.org/10.1520/D7214-07AR12>
- [23]. ASTM D7412-18 Standard Test Method for Condition Monitoring of Phosphate Antiwear Additives in In-Service Petroleum and Hydrocarbon Based Lubricants by Trend Analysis Using Fourier Transform Infrared (FT-IR) Spectrometry, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018, <https://doi.org/10.1520/D7412-18>
- [24]. ASTM D7414-18 Standard Test Method for Condition Monitoring of Oxidation in In-Service Petroleum and Hydrocarbon Based Lubricants by Trend Analysis Using Fourier Transform Infrared (FT-IR) Spectrometry, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018, <https://doi.org/10.1520/D7414-18>
- [25]. ASTM D5185-18 Standard Test Method for Multielement Determination of Used and Unused Lubricating Oils and Base Oils by Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometry (ICP-AES), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018, <https://doi.org/10.1520/D5185-18>
- [26]. UNE-EN 61010-1:2011 Requisitos de seguridad de equipos eléctricos de medida, control y uso en laboratorio. Parte 1: Requisitos generales. 2011-06-22/Vigente, CTN 82/SC4 – METROLOGÍA ELÉCTRICA.
- [27]. UNE-EN 61326-1:2013 (Ratificada) Material eléctrico para medida, control y uso en laboratorio. Requisitos de compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 1: Requisitos generales. (Ratificada por AENOR en marzo de 201). 2013-03-01, CTN 203/SC65 – MEDIDA Y CONTROL DE PROCESOS INDUSTRIALES-FIELDBUS.
- [28]. ASTM D445-17a Standard Test Method for Kinematic Viscosity of Transparent and Opaque Liquids (and Calculation of Dynamic Viscosity), ASTM

- International, West Conshohocken, PA, 2017, <https://doi.org/10.1520/D0445-17A>
- [29]. ASTM D7590-09(2014) Standard Guide for Measurement of Remaining Primary Antioxidant Content In In-Service Industrial Lubricating Oils by Linear Sweep Voltammetry, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014, <https://doi.org/10.1520/D7590-09R14>
- [30]. ASTM D6971-09(2014) Standard Test Method for Measurement of Hindered Phenolic and Aromatic Amine Antioxidant Content in Non-zinc Turbine Oils by Linear Sweep Voltammetry, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014, <https://doi.org/10.1520/D6971-09R14>
- [31]. ASTM D6810-13 Standard Test Method for Measurement of Hindered Phenolic Antioxidant Content in Non-Zinc Turbine Oils by Linear Sweep Voltammetry, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013, <https://doi.org/10.1520/D6810-13>