



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

**EVALUACIÓN DE TRES FORMULACIONES
DIFERENTES DE ACEITES LUBRICANTES Y SU
IMPACTO EN EL MANTENIMIENTO DE UNA FLOTA DE
AUTOBUSES**

TRABAJO FINAL DEL

Máster Universitario en Ingeniería del Mantenimiento

REALIZADO POR

Jorge Castelló Villanueva

TUTORIZADO POR

Bernardo Tormos Martínez

Antonio García Barberá

CURSO ACADÉMICO: 2020/2021

Resumen

Los motores de combustión interna alternativos (MCIA) son equipos que requieren de un sistema de lubricación específico para su correcto funcionamiento. A través de este trabajo, y atendiendo a las tendencias de los formuladores de aceites y de los propios constructores de los motores, se pretende estudiar el comportamiento y las tendencias de degradación y desgaste de diferentes formulaciones de aceites lubricantes de baja viscosidad. Este tipo de aceites lubricantes despiertan interés debido al efecto sobre la reducción de las pérdidas mecánicas en los MCIA, con el consecuente ahorro en el consumo de combustible y el gasto económico derivado.

A pesar de esta virtud, resulta de vital importancia corroborar que el uso de estas formulaciones no provoque problemas relacionados con una lubricación deficiente. Los aceites lubricantes se degradan y contaminan con el uso, lo cual repercute en su comportamiento teniendo un impacto (en diferente medida) sobre el MCIA. Por ello, mediante este trabajo se puede observar que los aceites lubricantes de baja viscosidad estudiados, en comportamiento real en una flota de vehículos, presentan resultados similares, en cuanto a degradación y desgaste, a las formulaciones originales destinadas a los vehículos involucrados en el estudio. Se puede extraer, como principal conclusión, que el uso de aceites lubricantes de baja viscosidad produce un ahorro de combustible sin una penalización sobre el desgaste y el mantenimiento de los MCIA.

Palabras clave

Mantenimiento, lubricación, MCIA, Oil Condition Monitoring, aceites lubricantes, baja viscosidad

Resum

Els motors de combustió interna alternatius (MCIA) són equips que requereixen d'un sistema de lubricació específic per al seu correcte funcionament. Mitjançant aquest treball, i tenint en compte les tendències dels formuladors dels lubricants i dels propis constructors dels motors, es pretén estudiar el comportament i les tendències de degradació i desgast de diferents formulacions d'olis lubricants de baixa viscositat. Aquest tipus d'olis lubricants generen interès degut al efecte sobre la reducció de les pèrdues mecàniques en els MCIA, amb el consegüent estalvi de combustible i el cost econòmic derivat.

No obstant, resulta de vital importància corroborar que l'ús d'aquestes formulacions no provoquino problemes relacionats amb una lubricació deficient. Els olis lubricants es degraden i contaminen amb l'ús, la qual cosa repercuteix en el seu comportament tenint un impacte (en diferent grau) sobre el MCIA. Per aquesta raó, mitjançant aquets treball es pot observar que els olis lubricants de baixa viscositat estudiats, en comportament real en una flota de vehicles, presenten resultats semblants, pel que respecta a degradació i desgast, als de les formulacions originals destinades als vehicles involucrats en l'estudi. Es pot extraure, com principal conclusió, que l'ús d'olis de baixa viscositat produeix un estalvi de combustible sense penalitzar sobre el desgast i el manteniment dels MCIA.

Paraules clau

Manteniment, lubricació, MCIA, Oil Condition Monitoring, olis lubricants, baixa viscositat

Abstract

Internal combustion engines (ICE) are equipment which require a specific lubrication system for their correct operation. Through this work, taking into account oil formulators trends and engine manufacturers themselves, the aim is to study the behaviour and the degradation and wear trends of three different low viscosity oil formulations. This kind of lubricating oil is of interest due to its effect on mechanical losses reduction in ICE, with the resulting fuel consumption saving and economic costs derived.

Despite this virtue, it is critical to check whether the use of these formulations will not cause issues of poor lubrication. Lubricating oils degrade and contaminate with use, which has an impact (in varying degrees) in terms of the ICE behaviour. Therefore, this study shows how low viscosity oils, when used in a vehicles fleet, present similar results, in terms of degradation and wear, to the original formulations used in the vehicles involved in the study. The main conclusion to be drawn is the fact that using low viscosity oils leads to fuel saving without penalising ICE wearing and maintenance.

Keywords

Maintenance, lubrication, ICE, Oil Condition Monitoring, lubricant oils, low viscosity

ÍNDICE

ÍNDICE DE TABLAS	7
ÍNDICE DE FIGURAS	8
1. INTRODUCCIÓN	11
1.1. Introducción	11
1.2. Objetivos y alcance	11
1.3. Antecedentes y justificación	12
1.4. Planteamiento	12
2. MANTENIMIENTO Y LUBRICACIÓN EN MCIA	13
2.1. Mantenimiento en MCIA	13
2.1.1. Mantenimiento correctivo	13
2.1.2. Mantenimiento preventivo	13
2.1.3. Mantenimiento predictivo	14
2.1.4. Mantenimiento modificativo	14
2.2. Lubricación en MCIA	15
2.2.1. Composición de los lubricantes	15
2.2.2. Propiedades físico-químicas de los lubricantes	19
2.2.3. Clasificación de los lubricantes	24
3. MANTENIMIENTO PREDICTIVO BASADO EN LA CONDICIÓN DEL ACEITE (<i>OIL CONDITION MONITORING</i>) EN MCIA	29
3.1. Degradación	29
3.2. Contaminación	32
3.3. Desgaste	33
4. TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE LUBRICANTE EN MCIA	37
4.1. Viscosidad cinemática	37
4.2. Valoración del índice TAN/TBN	39
4.3. Voltamperometría lineal de barrido	40
4.4. Espectrometría infrarroja	42
4.5. Espectrometría ICP-OES	45

5. PRUEBA DE CAMPO DE LUBRICANTES EN MCIA	48
5.1. Definición de la prueba	48
5.2. Procedimiento de muestreo	50
5.3. Protocolo de análisis	53
5.4. Resultados	56
5.4.1. Resultados Diésel Euro V	56
5.4.2. Resultados Diésel EEV	61
5.4.3. Resultados Diésel Euro IV	66
5.4.4. Resultados GNC EEV	71
5.5. Comportamiento de las formulaciones estudiadas	76
6. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	81
6.1. Conclusiones	81
6.2. Trabajos futuros	82
BIBLIOGRAFÍA	83

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1: CLASIFICACIÓN API DE LAS BASES LUBRICANTES.....	17
TABLA 2: SAE J300_201501 - ENGINE OIL VISCOSITY CLASSIFICATION.....	25
TABLA 3: DESARROLLO Y VIGENCIA DE LAS CLASIFICACIONES API.....	26
TABLA 4: GASOLINE AND LIGHT DUTY DIESEL ENGINE OILS	27
TABLA 5: CATALYST COMPATIBL OILS FOR GASOLINE AND LIGHT DUTY DIESEL ENGINES WITH AFTERTREATMENT DEVICES....	27
TABLA 6: HEAVY DUTY DIESEL ENGINES.....	28
TABLA 7: EFECTOS CARACTERÍSTICOS SOBRE LA VISCOSIDAD CINEMÁTICA.....	29
TABLA 8: PARÁMETROS DE DEGRADACIÓN Y TÉCNICA ANALÍTICA EMPLEADA.....	32
TABLA 9: PARÁMETROS DE CONTAMINACIÓN Y TÉCNICA ANALÍTICA EMPLEADA	33
TABLA 10: TIPOS GENÉRICOS DE DESGASTE EN DIVERSAS PARTES DE UN MCIA	35
TABLA 11: ELEMENTOS QUÍMICOS Y ORIGEN DE LOS MISMOS.....	36
TABLA 12: LONGITUD DE ONDA (NM), RANGO (PPM) Y LÍMITE DE DETECCIÓN (PPM) PARA ICP-OES	47
TABLA 13: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LOS MODELOS DE AUTOBÚS	49
TABLA 14: CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LOS ACEITES.....	49
TABLA 15: RELACIÓN ENTRE LOS MODELOS DE AUTOBÚS Y EL ACEITE UTILIZADO	50

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1: CURVA DE STRIBECK	21
FIGURA 2: PRIMERA ETAPA DE OXIDACIÓN.....	31
FIGURA 3: SEGUNDA ETAPA DE OXIDACIÓN.....	31
FIGURA 4: TERCERA ETAPA DE OXIDACIÓN.....	31
FIGURA 5: BAÑO TERMOSTÁTICO CON CONTROL DE TEMPERATURA DIGITAL	37
FIGURA 6: VISCOSÍMETRO CAPILAR CANON-FENSKE PARA FLUIDOS OPACOS.....	38
FIGURA 7: EQUIPO 859 TITROTHERM DE METROHM	39
FIGURA 8: RULER ANTIOXIDANT MONITORING DE FLUI TEC	41
FIGURA 9: FT-IR DE A2 TECHNOLOGIES DE LA SERIE 6600T	43
FIGURA 10: ICP-OES DE THERMO SCIENTIFIC, MODELO ICAP 7400 CON CONFIGURACIÓN RADIAL	45
FIGURA 11: CÁMARA DE NEBULIZACIÓN CICLÓNICA DE DOBLE PASO	46
FIGURA 12: INTRODUCCIÓN DEL TUBO DE POLIURETANO EN EL CÁRTER	51
FIGURA 13: PROCESO DE EXTRACCIÓN DEL ACEITE.....	52
FIGURA 14: ETIQUETA IDENTIFICADORA DE MUESTRA	53
FIGURA 15: EJEMPLO ETIQUETA COMPLETA.....	53
FIGURA 16: VISCOSÍMETRO CAPILAR EN MONTAJE (IZQUIERDA) Y EN USO (DERECHA).....	53
FIGURA 17: ESPECTRÓMETRO INFRARROJO	54
FIGURA 18: EQUIPO RULER	54
FIGURA 19: TERMOMETRÍA TAN/TBN	55
FIGURA 20: ESPECTRÓMETRO ICP-OES	55
FIGURA 21: DIÉSEL EURO V - KV A 40°C.....	56
FIGURA 22: DIÉSEL EURO V - KV A 100°C.....	56
FIGURA 23: DIÉSEL EURO V - TAN	56
FIGURA 24: DIÉSEL EURO V - TBN	56
FIGURA 25: DIÉSEL EURO V - OXIDACIÓN	56
FIGURA 26: DIÉSEL EURO V - NITRACIÓN.....	56
FIGURA 27: DIÉSEL EURO V – AD. AMÍNICOS.....	57
FIGURA 28: DIÉSEL EURO V – AD. ANTIDESGASTE	57
FIGURA 29: DIÉSEL EURO V - RUL NUMBER	57
FIGURA 30: DIÉSEL EURO V - SOOT	57
FIGURA 31: DIÉSEL EURO V - SILICIO	57
FIGURA 32: DIÉSEL EURO V - SODIO.....	57
FIGURA 33: DIÉSEL EURO V - HIERRO	58
FIGURA 34: DIÉSEL EURO V - ALUMUNIO	58
FIGURA 35: DIÉSEL EURO V - PLOMO	58
FIGURA 36: DIÉSEL EURO V - ESTAÑO.....	58
FIGURA 37: DIÉSEL EURO V - COBRE.....	58
FIGURA 38: DIÉSEL EURO V - BARIO	58
FIGURA 39: DIÉSEL EURO V - BORO.....	59
FIGURA 40: DIÉSEL EURO V - CALCIO	59
FIGURA 41: DIÉSEL EURO V - ZINC	59
FIGURA 42: DIÉSEL EURO V - FÓSFORO	59
FIGURA 43: DIÉSEL EURO V - MAGNESIO.....	59
FIGURA 44: DIÉSEL EURO V - MOLIBDENO.....	59
FIGURA 45: DIÉSEL EEV - KV A 40°C	61
FIGURA 46: DIÉSEL EEV - KV A 100°C	61
FIGURA 47: DIÉSEL EEV - TAN.....	61
FIGURA 48: DIÉSEL EEV - TBN.....	61
FIGURA 49: DIÉSEL EEV - OXIDACIÓN	61
FIGURA 50: DIÉSEL EEV - NITRACIÓN	61
FIGURA 51: DIÉSEL EEV - AD. AMÍNICOS	62

FIGURA 52: DIÉSEL EEV - AD. ANTIDESGASTE	62
FIGURA 53: DIÉSEL EEV - RUL NUMBER	62
FIGURA 54: DIÉSEL EEV - SOOT	62
FIGURA 55: DIÉSEL EEV - SILICIO	62
FIGURA 56: DIÉSEL EEV - SODIO.....	62
FIGURA 57: DIÉSEL EEV - HIERRO	63
FIGURA 58: DIÉSEL EEV - ALUMINIO	63
FIGURA 59: DIÉSEL EEV - PLOMO	63
FIGURA 60: DIÉSEL EEV - ESTAÑO	63
FIGURA 61: DIÉSEL EEV - COBRE	63
FIGURA 62: DIÉSEL EEV - BARIO.....	63
FIGURA 63: DIÉSEL EEV - BORO	64
FIGURA 64: DIÉSEL EEV - CALCIO.....	64
FIGURA 65: DIÉSEL EEV - ZINC	64
FIGURA 66: DIÉSEL EEV - FÓSFORO.....	64
FIGURA 67: DIÉSEL EEV - MAGNESIO	64
FIGURA 68: DIÉSEL EEV - MOLIBDENO	64
FIGURA 69: DIÉSEL EURO IV - KV A 40°C.....	66
FIGURA 70: DIÉSEL EURO IV - KV A 100°C.....	66
FIGURA 71: DIÉSEL EURO IV - TAN	66
FIGURA 72: DIÉSEL EURO IV - TBN	66
FIGURA 73: DIÉSEL EURO IV - OXIDACIÓN	66
FIGURA 74: DIÉSEL EURO IV - NITRACIÓN.....	66
FIGURA 75: DIÉSEL EURO IV - AD. AMÍNICOS	67
FIGURA 76: DIÉSEL EURO IV - AD. ANTIDESGASTE	67
FIGURA 77: DIÉSEL EURO IV - RUL NUMBER	67
FIGURA 78: DIÉSEL EURO IV - SOOT	67
FIGURA 79: DIÉSEL EURO IV - SILICIO	67
FIGURA 80: DIÉSEL EURO IV - SODIO	67
FIGURA 81: DIÉSEL EURO IV - HIERRO	68
FIGURA 82: DIÉSEL EURO IV - ALUMINIO.....	68
FIGURA 83: DIÉSEL EURO IV - PLOMO	68
FIGURA 84: DIÉSEL EURO IV - ESTAÑO.....	68
FIGURA 85: DIÉSEL EURO IV - COBRE.....	68
FIGURA 86: DIÉSEL EURO IV - BARIO	68
FIGURA 87: DIÉSEL EURO IV - BORO.....	69
FIGURA 88: DIÉSEL EURO IV - CALCIO.....	69
FIGURA 89: DIÉSEL EURO IV - ZINC	69
FIGURA 90: DIÉSEL EURO IV - FÓSFORO	69
FIGURA 91: DIÉSEL EURO IV - MAGNESIO.....	69
FIGURA 92: DIÉSEL EURO IV - MOLIBDENO.....	69
FIGURA 93: GNC EEV - KV A 40°C	71
FIGURA 94: GNC EEV - KV A 100°C	71
FIGURA 95: GNC EEV - TAN.....	71
FIGURA 96: GNC EEV - TBN.....	71
FIGURA 97: GNC EEV - OXIDACIÓN.....	71
FIGURA 98: GNC EEV - NITRACIÓN	71
FIGURA 99: GNC EEV - AD. AMÍNICOS.....	72
FIGURA 100: GNC EEV - AD. ANTIDESGASTE.....	72
FIGURA 101: GNC EEV - RUL NUMBER	72
FIGURA 102: GNC EEV - SOOT.....	72
FIGURA 103: GNC EEV - SILICIO	72
FIGURA 104: GNC EEV - SODIO.....	72

FIGURA 105: GNC EEV - HIERRO	73
FIGURA 106: GNC EEV - ALUMINIO	73
FIGURA 107: GNC EEV - PLOMO	73
FIGURA 108: GNC EEV - ESTAÑO	73
FIGURA 109: GNC EEV - COBRE	73
FIGURA 110: GNC EEV - BARIO	73
FIGURA 111: GNC EEV - BORO	74
FIGURA 112: GNC EEV - CALCIO	74
FIGURA 113: GNC EEV - ZINC	74
FIGURA 114: GNC EEV - FÓSFORO.....	74
FIGURA 115: GNC EEV - MAGNESIO	74
FIGURA 116: GNC EEV - MOLIBDENO	74
FIGURA 117: VISCOSIDAD CINEMÁTICA A 40°C DEL ACEITE A (VERDE), ACEITE B (ROJO) Y ACEITE C (AZUL)	76
FIGURA 118: VISCOSIDAD CINEMÁTICA A 100°C DEL ACEITE A (VERDE), ACEITE B (ROJO) Y ACEITE C (AZUL).....	76
FIGURA 119: TAN DEL ACEITE A (VERDE), ACEITE B (ROJO) Y ACEITE C (AZUL)	77
FIGURA 120: TBN DEL ACEITE A (VERDE), ACEITE B (ROJO) Y ACEITE C (AZUL)	77
FIGURA 121: OXIDACIÓN DEL ACEITE A (VERDE), ACEITE B (ROJO) Y ACEITE C (AZUL)	78
FIGURA 122: NITRACIÓN DEL ACEITE A (VERDE), ACEITE B (ROJO) Y ACEITE C (AZUL).....	78
FIGURA 123: ADITIVOS AMÍNICOS DEL ACEITE A (VERDE), ACEITE B (ROJO) Y ACEITE C (AZUL).....	79
FIGURA 124: ADITIVOS ANTIDESGASTE DEL ACEITE A (VERDE), ACEITE B (ROJO) Y ACEITE C (AZUL).....	79
FIGURA 125: RUL NUMBER DEL ACEITE A (VERDE), ACEITE B (ROJO) Y ACEITE C (AZUL)	80

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Introducción

Los motores de combustión interna alternativos (MCIA) requieren de lubricación para su correcto funcionamiento. El lubricante que circula por el sistema de lubricación se ve expuesto a fenómenos que debe enfrentar como las elevadas temperaturas que se dan en el interior del motor, los productos de la combustión y la posible contaminación. Debido a dichos fenómenos, el lubricante debe poseer una serie de propiedades físicas y químicas que garantice un correcto funcionamiento del motor durante su vida útil.

Actualmente, a través de la evolución de la lubricación y de la mejora de la eficiencia de los motores térmicos se ha contribuido a la búsqueda de soluciones más eficaces referentes a la lubricación. De esta manera, con el uso de los aceites de baja viscosidad se pretende reducir la fricción, por tanto, las pérdidas mecánicas y consecuentemente aumentar la eficiencia y reducir el consumo de combustible y las emisiones contaminantes [1]. Logrando dichos objetivos se consigue un motor más eficiente y respetuoso con el medio ambiente.

Desafortunadamente, los aceites de baja viscosidad podrían tener efectos nocivos sobre los motores en los que se emplean como una degradación excesiva del lubricante o un desgaste anómalo del motor. Por dicho motivo, a través de este trabajo se pretende estudiar y analizar el comportamiento de dichos lubricantes en los motores de una flota de autobuses para determinar el impacto en términos de degradación y desgaste, descartando de esta manera posibles consecuencias en los aspectos relacionados con el mantenimiento del motor.

La monitorización del aceite lubricante, conocida por su término en inglés *Oil Condition Monitoring*, es una técnica de mantenimiento predictivo que proporciona información sobre el estado real del lubricante y del motor [2]. Con la utilización de esta técnica, se puede realizar un seguimiento para prevenir fallos y paradas productivas no deseadas. La técnica consiste en la extracción de una muestra de aceite periódicamente para su posterior análisis en laboratorio químico con las técnicas analíticas asociadas a los parámetros sobre los que se desea realizar el seguimiento [3].

Para la realización de este estudio, enfocado en los parámetros de degradación del lubricante y desgaste del motor, se han empleado las técnicas analíticas de medición de la viscosidad cinemática, la valoración del índice TAN/TBN, la voltamperometría lineal de barrido, la espectrometría infrarroja y la espectrometría ICP-OES.

1.2. Objetivos y alcance

El objetivo principal de este trabajo es conocer el impacto de los aceites lubricantes de baja viscosidad en el mantenimiento de vehículos que emplean formulaciones de viscosidad superiores atendiendo al ahorro de combustible, la degradación del lubricante y el desgaste del motor.

Para obtener una consecución satisfactoria del objetivo principal, se deben lograr los siguientes objetivos específicos:

- Definir un del plan de muestreo acorde a la disponibilidad de los vehículos, así como establecer un periodo de muestreo que proporcione suficiente información.

- Seleccionar los parámetros que se desean monitorizar para un resultado exitoso de la prueba y, tras ello, elegir las técnicas analíticas disponibles para una correcta medición de dichos parámetros.
- Observar los resultados obtenidos de cada uno de los parámetros y analizar su tendencia dentro del periodo de cambio del aceite.

1.3. Antecedentes y justificación

En las últimas décadas se ha generado un gran interés en el estudio de los lubricantes en el MCIA debido a que, en grandes flotas de vehículos, el análisis del aceite lubricante tiene como objetivo principal reducir los costes de mantenimiento. Cabe destacar que se debe lograr dichos objetivos sin afectar a la vida útil del motor.

Diversos estudios realizados previamente asocian el uso de aceites de baja viscosidad con una reducción en el consumo de combustible. A pesar de ello, todavía se debe estudiar dichos lubricantes en términos de degradación del propio lubricante y del desgaste del motor para aplicarlo en el campo del mantenimiento. A través de este trabajo, se realiza dicho seguimiento para analizar el comportamiento de los mencionados aceites lubricantes de baja viscosidad.

Mediante el Laboratorio de Lubricantes y Combustibles del Departamento de Máquinas y Motores Térmicos se asegura la disponibilidad y viabilidad tecnológica de los equipos necesarios para el desarrollo de este trabajo.

1.4. Planteamiento

Este trabajo consta de seis partes bien diferenciadas, a saber:

La primera parte, también llamada Capítulo 1, presenta este trabajo dando a conocer tanto el objetivo principal como los objetivos secundarios necesarios para la consecución del objetivo principal propuesto. Además, se acota el alcance del Trabajo, así como se realiza una justificación del mismo.

La segunda parte, en el Capítulo 2, describe en un primer lugar los diferentes tipos de mantenimientos que se pueden realizar en un MCIA para, en un segundo lugar, describir los lubricantes utilizados en el desarrollo de este Trabajo.

La tercera parte, en el Capítulo 3, detalla en profundidad el mantenimiento predictivo basado en la condición del aceite y describe los tipos de degradación y contaminación que pueden sufrir los lubricantes y el desgaste asociado al motor, para así asociarlos a diferentes problemas característicos en los MCIA.

La cuarta parte, en el Capítulo 4, desarrolla una serie de características y fundamentos en las técnicas analíticas aplicadas para el estudio del comportamiento de los lubricantes en MCIA. Cabe destacar que las técnicas desarrolladas a lo largo de este trabajo son bastante actuales para el análisis de lubricante en MCIA, pero no son las únicas existentes.

La quinta parte, en el Capítulo 5, muestra la definición de la prueba de campo realizada, así como el procedimiento a seguir para la toma de muestras. A continuación, se presentan los resultados obtenidos de los diferentes parámetros con sus respectivos análisis posteriores.

Por último, en el Capítulo 6, se extraen una serie de conclusiones finales basadas en los análisis realizados sobre los resultados obtenidos.

2. MANTENIMIENTO Y LUBRICACIÓN EN MCIA

2.1. Mantenimiento en MCIA

El mantenimiento se define como el conjunto de acciones o técnicas que permiten conservar o restablecer un equipo en un estado específico y asegurar un determinado servicio con un coste mínimo y la máxima seguridad [4]. Actualmente, la terminología industrial y social tiene en cuenta el concepto de mantenimiento y éste realiza funciones tan importantes como las denominadas acciones productivas.

El objetivo fundamental del mantenimiento es conseguir que el equipo en cuestión trabaje durante un determinado periodo de tiempo en las condiciones deseadas a un mínimo coste y garantizando siempre la seguridad.

Para obtener este objetivo fundamental, se deben lograr los siguientes objetivos más específicos:

- Minimizar el coste asociado a paradas no planificadas que repercutan en pérdidas en la producción, añadiendo a tales costes los propios costes del mantenimiento.
- Controlar el deterioro de la maquinaria para reducir las faltas de calidad en el producto o servicio.
- Otorgar conocimientos y asistencia obtenidos a través de la experiencia a aquellos que se embarcan en proyectos y gestión de nuevas instalaciones.

Para lograr los objetivos anteriores se pueden seguir diferentes tipos de mantenimientos clasificados a continuación.

2.1.1. *Mantenimiento correctivo*

A través del mantenimiento correctivo, se utiliza la máquina hasta que esta falla. Este tipo de mantenimiento se reduce a reparar el fallo una vez se ha producido, por lo que las inversiones previas son mínimas, pero se producen unas desventajas importantes como la imprevisión de la avería produciendo paradas improductivas y la inseguridad.

Por esta razón, solamente se recomienda este tipo de mantenimiento en las siguientes ocasiones:

- Cuando los requerimientos de seguridad lo permiten y los costes asociados al fallo son mínimos.
- Cuando los paros imprevistos eventuales de la maquinaria no son críticos para el rendimiento y la producción.
- Cuando el material es renovado con relativamente alta frecuencia.

2.1.2. *Mantenimiento preventivo*

El mantenimiento preventivo determina una serie de paradas a intervalos fijos para efectuar las intervenciones de mantenimiento en los sistemas antes de que se produzca la avería. La frecuencia de intervención determinada es independiente de cada máquina y se debe crear una metodología para conocer la misma en cada una de las máquinas.

De esta manera, se puede afirmar que el mantenimiento preventivo tiene los siguientes objetivos:

- Incrementar la fiabilidad y disponibilidad de los equipos y, por lo tanto, reducir los fallos con sus respectivos costes.
- Incrementar la vida útil del equipo en comparación con el mantenimiento correctivo.
- Garantizar la seguridad.

Este tipo de mantenimiento provoca fundamentalmente dos inconvenientes muy remarcados. Por una parte, se provocan paros en la actividad productiva para realizar las intervenciones de mantenimiento. Por otra parte, las piezas o elementos no han llegado al final de su vida útil antes de ser sustituidas, lo cual conlleva una pérdida económica. Cabe destacar que la pérdida económica producida por el remanente de vida útil es siempre inferior al paro de la producción por el fallo imprevisto de la misma pieza.

2.1.3. Mantenimiento predictivo

El mantenimiento predictivo es una variante del mantenimiento preventivo puesto que ambos comparten la premisa de sustituir la pieza o equipo antes de que sobrevenga el fallo. La principal diferencia es que el mantenimiento predictivo permite predecir el estado y fiabilidad de la máquina o equipo sin la necesidad de pararla. A través de la medición de los parámetros críticos de las máquinas, se puede ajustar con una precisión más elevada el ciclo de vida útil de los componentes que deben ser tratados.

Así mismo, este tipo de mantenimiento predictivo presenta objetivos diferentes al mantenimiento preventivo como:

- Monitorización del síntoma hasta que se alcanza el valor límite fijado previamente.
- Eliminación de la incertidumbre al diagnosticar el tipo de fallo, el lugar donde se produce y la severidad.

Al igual que en el caso anterior, este tipo de mantenimiento presenta dos inconvenientes muy característicos. Por una parte, los equipos de medición empleados en el diagnóstico son sofisticados y de un precio elevado. Por otra parte, la necesidad de personal cualificado para realizar las mediciones correctamente e interpretar los resultados obtenidos posteriormente a través de la gran cantidad de información generada.

2.1.4. Mantenimiento modificativo

El mantenimiento modificativo no se trata de un tipo de mantenimiento propiamente definido, sino que engloba todas las acciones adicionales al mantenimiento tradicional pero que optimiza este último. Este tipo de acciones adicionales son trabajos de mejora, instalación de nuevos equipos y todas las tareas cuyo objetivo principal es evitar los fallos en los elementos y equipos.

Se puede resumir a grandes rasgos este tipo de mantenimiento como todo aquel mantenimiento que no forma parte del correctivo, preventivo y predictivo.

2.2. Lubricación en MCI

La lubricación se define como la interposición de una sustancia (llamada lubricante) entre dos superficies con movimiento relativo que se encuentran en contacto. El objetivo principal de la lubricación es reducir la fricción entre las dos superficies ya que una menor fricción conlleva un menor desgaste, una menor generación de calor y menores pérdidas energéticas [5]. Además, proporciona beneficios como la reducción de los costes de mantenimiento, el aumento de la vida útil de los componentes y la reducción de los periodos de inactividad. Por otra parte, la lubricación tiene otros objetivos secundarios como la refrigeración, limpieza, arrastre y eliminación de residuos.

El sistema de lubricación del MCI se compone de los siguiente elementos y sistemas: un cárter, encargado de almacenar el lubricante; una bomba, cuya función es aspirar el lubricante del cárter e impulsarlo a los elementos a lubricar; un sistema de filtrado, para evitar que las impurezas circulen por el sistema de lubricación; un sistema de ventilación, para la eliminación de fluidos como agua y combustible; y un sistema de control del lubricante, para conocer la temperatura, presión y cantidad del lubricante.

2.2.1. Composición de los lubricantes

La sustancia colocada entre las superficies se denomina lubricante y se puede encontrar tanto en estado sólido como en estado líquido o gaseoso. A lo largo de este trabajo, se va a hacer referencia al lubricante en estado líquido, ya que es el tipo de lubricante empleado actualmente en los motores.

Los aceites lubricantes son formulados a partir de una base lubricante, que proporciona una capa fluida entre las dos superficies móviles, a la que se añaden aditivos químicos que mejoran las propiedades de los lubricantes.

2.2.1.1. Bases lubricantes

La utilización del crudo en el sector de la lubricación de los MCI propone una división de las bases entre las bases minerales y las bases sintéticas.

- Bases minerales

Las bases minerales son hidrocarburos lineales que provienen de la destilación fraccionada del crudo. Éstas tienen gran cantidad de hidrocarburos y pequeñas cantidades de azufre, oxígeno, nitrógeno y sales minerales.

Las propiedades físicas varían en función de la composición química del crudo, ya que cada yacimiento proporciona un crudo diferente. Los tipos de moléculas son los mismos, pero la variación en la cantidad de éstas es lo que origina una diferencia en el comportamiento físico-químico.

El refinado son tratamientos físicos y químicos realizados posteriormente a la extracción para mejorar las propiedades finales. En este proceso, los compuestos deseados se logran mediante destilación atmosférica y de vacío. Tras ello, una serie de tratamientos eliminan las impurezas y obtienen las características finales de la base.

Las bases obtenidas presentan una temperatura de inflamación y de ebullición muy alta. Su composición es una mezcla compleja de hidrocarburos parafínicos, nafténicos y aromáticos. En función del hidrocarburo predominante en la mezcla se pueden obtener los siguientes tipos de bases:

- Bases parafínicas: Hidrocarburos saturados y gran cantidad de cadenas de alcanos ramificados. Baja densidad e Índice de Viscosidad cercano a 100.
- Bases nafténicas: Hidrocarburos cíclicos saturados con propiedades opuestas a las bases parafínicas. Densidad elevada e Índice de Viscosidad entre 40 y 60.
- Bases aromáticas: Cadenas de hidrocarburos insaturados y anillos aromáticos. Poseen la mayor densidad y el Índice de Viscosidad más bajo.

En función de los requerimientos de trabajo se utiliza cada una de las bases. Además, a mayor complejidad en el proceso de extracción y refino, mayor precio económico de la base.

- Bases sintéticas

Las bases sintéticas se pueden fabricar de dos maneras diferentes. La primera de ellas es mediante síntesis química donde pueden eliminarse partículas no deseadas para aportar al aceite una mejora en sus características. La segunda forma es mediante post-tratamiento de diferentes hidrocarburos hasta que los componentes tengan una estructura molecular capaz de cumplir con una función específica.

El proceso de elaboración es más costoso pero su alta resistencia les permite realizar un número menor de cambios. Al contar con unas propiedades conocidas, se convierten en bases de gran interés para aceites de altas prestaciones.

En la formulación de las bases sintéticas, los principales compuestos empleados son diésteres, ésteres fosfatados, polialfaolefinas (PAO), poliol-ésteres, poliglicoles (PAG), hidrocarburos sintéticos y siliconas.

Tras una clasificación realizada por el Instituto Americano de Petróleo (API), mostrada en la Tabla 1, se puede diferenciar claramente las bases minerales de las sintéticas [6]. Esta división se realiza en diferentes grupos, perteneciendo a las bases minerales los grupos I, II y III, mientras que a las bases sintéticas los grupos IV y V.

- Grupo I: Bases refinadas por solventes. Al tratarse del proceso de extracción más simple, se trata además del proceso más económico y con menores propiedades.
- Grupo II: Proceso de obtención ligeramente más costoso que las bases del Grupo I, pero con las moléculas de hidrocarburos saturadas, lo cual supone mejores propiedades frente a la oxidación.
- Grupo III: Mayor refino y elevadas características técnicas debido al proceso de fraccionamiento a alta presión y temperatura al que son sometidas.
- Grupo IV: Polialfaolefinas obtenidas mediante proceso de síntesis. Mejores propiedades en general que los grupos previos y rango de temperaturas de trabajo mucho más amplio.
- Grupo V: Este grupo incluye el resto de bases que generalmente son utilizadas en aplicaciones específicas.

	Grupo	Proceso	Azufre (%)	HC saturados (%)	Índice de viscosidad
Mineral	I	Extracción con disolventes	>0,03	<90	80 – 120
	II	Hidrotratamiento	<0,03	>90	80 – 120
	III	Hidrocracking	<0,03	>90	>120
Sintético	IV	PAO – Polialfaolefinas			
	V	Todas las bases no incluidas en grupos I, II, III o IV			

Tabla 1: Clasificación API de las bases lubricantes

2.2.1.2. Aditivos

Los aditivos son utilizados para cubrir las exigencias del lubricante en los procesos industriales [7]. A continuación, se detallan los aditivos más comunes en los MCIA:

- Aditivos antioxidantes

Los aditivos antioxidantes retardan el proceso oxidativo previniendo la formación de productos nocivos. Esto se debe a que el proceso de oxidación de un hidrocarburo provoca su comportamiento ácido y la formación de lodos o barnices.

Este tipo de aditivos se encargan de neutralizar los radicales libres mediante la inhibición de la formación de peróxidos o formando productos estables debido a su actuación como agentes de terminación de cadena que reaccionan con los radicales libres.

Los compuestos más típicos suelen ser de tipo fenólico o amínico, pero hay otro tipo de aditivos con propiedades antioxidantes a base de zinc y fósforo como el dialquilditiofosfato de zinc (ZDDP).

- Anticorrosivos

Los ácidos formados debido a las altas temperaturas atacan y dañan a los componentes metálicos en el interior del motor. La corrosión aparece como combinación de la variación de temperatura con el arrastre de oxígeno atmosférico y la humedad de la combustión.

Los aditivos anticorrosivos hacen frente específicamente a dicho proceso electroquímico formando una película que actúa de barrera evitando la entrada de agua y oxígeno a la superficie metálica.

Generalmente, se utilizan aditivos detergentes básicos para superficies de cobre, estaño o plomo, mientras que los inhibidores de herrumbre son empleados para proteger las partes con hierro.

- Detergentes y dispersantes

Los aditivos detergentes controlan el depósito de partículas a altas temperaturas, mientras que los aditivos dispersantes controlan la formación de lodos a bajas temperaturas y su aglomeración. Los detergentes se componen de sales metálicas de ácidos orgánicos y los dispersantes suelen ser ésteres de alto peso molecular.

Este tipo de aditivos previenen la aglomeración y deposición de las partículas contaminantes introducidas en el aceite al rodearlas y mantenerlas en un estado de suspensión coloidal dentro del lubricante. De dicha manera, se logra una limpieza de los conductos y superficies evitando acumulaciones de los residuos.

- Agentes neutralizantes

Los agentes neutralizantes son los encargados de neutralizar los ácidos que aparecen en el lubricante después del proceso de combustión. Debido a que los combustibles actuales tienen un contenido de azufre bastante reducido, el ácido sulfúrico ha dejado de ser un problema fundamental para centrar el foco en otras clases de ácidos.

La reserva alcalina es la capacidad de neutralización de dichos ácidos. Los detergentes como los sulfonatos de calcio, sulfuros alquilfenílicos y alquilsalicilatos pueden actuar como agentes neutralizantes ya que contienen del orden de 30 veces más cantidad de metales alcalinos.

- Antiespumantes

La espuma producida en los lubricantes por la agitación de los mismos no es deseable debido a que aumenta la oxidación del aceite al exponerlo al oxígeno. Otras desventajas asociadas son la reducción de la eficiencia como refrigerante y fluido hidráulico y la dificultad de trasegar a través del circuito de lubricación.

Los aditivos antiespumantes son generalmente siliconas y copolímeros orgánicos con menor tensión superficial que el aceite y baja solubilidad en él para que se extiendan sobre la superficie de las burbujas y colapsen.

Cabe destacar que este tipo de aditivos solamente se utilizan en aplicaciones muy concretas dentro de los aceites lubricantes de motor, siendo más común su utilización en aceites hidráulicos o aceites de engranajes.

- Aditivos antidesgaste

El objetivo principal de los aditivos antidesgaste es reducir el fenómeno de desgaste en el motor, el cual puede ser resultado de diferentes procesos. Estos aditivos se dividen en aditivos antidesgaste y de extrema presión o modificadores de fricción.

Por una parte, los aditivos antidesgaste y de extrema presión forman sobre la superficie a proteger una película semi-plástica de alta resistencia. En condiciones de cizallamiento, donde el coeficiente de fricción es alto, presentan una buena respuesta al desgaste.

Por otra parte, los aditivos modificadores de fricción son películas de matrices ordenadas con capas multimoleculares, las cuales están débilmente adheridas entre sí y con la cabeza polar anclada en la superficie del metal. Presentan un coeficiente de fricción bajo debido a que las capas exteriores de la película se pueden separar fácilmente.

De esta manera, los aditivos antidesgaste actúan frente a cargas medias y esporádicas, mientras que los aditivos de extrema presión actúan cuando se trabaja con cargas grandes y temperaturas elevadas.

A pesar de que hay gran cantidad de compuestos con propiedades antidesgaste, destacan los compuestos ZDDP porque cuenta con propiedades antioxidantes además de las antidesgaste ya mencionadas.

- Aditivos mejoradores del Índice de Viscosidad

Los aditivos mejoradores del Índice de Viscosidad permiten formular los aceites multigrado ya que logran que los aceites mantengan baja viscosidad a bajas temperaturas, pero puedan formar una película líquida adecuada en condiciones de funcionamiento.

Este tipo de aditivos se trata de cadenas poliméricas de alto peso molecular donde la capacidad espesante depende del tamaño de la molécula del polímero, siendo mayor la capacidad espesante cuanto mayor es el peso molecular.

Estos aditivos a bajas temperaturas son muy poco solubles en el aceite y tienen poco impacto sobre la viscosidad. Por el contrario, a altas temperaturas se vuelven más solubles y se expanden dificultando el movimiento de las moléculas del aceite. De esta manera, se reduce la velocidad con la que fluye el aceite al aumentar la temperatura.

El principal inconveniente de estos aditivos se presenta a altas tasas de esfuerzo cortante, donde pierden parte de su función ya que se rompen las cadenas moleculares iniciales resultando en polímeros más cortos que no aportan la misma variación de viscosidad.

- Aditivos mejoradores de las propiedades

Esta clase de aditivos incluyen a los aditivos que no se han cubierto en los apartados anteriores y mejoran alguna propiedad específica del aceite.

Por una parte, los aditivos mejoradores del índice de fluidez y punto de congelación son necesarios debido a que, en condiciones de bajas temperaturas, precipitan cristales que limitan la fluidez del aceite.

Por otra parte, los aditivos odorantes enmascaran los olores específicos de los lubricantes y los aditivos colorantes asignan un color determinado en función de las necesidades.

2.2.2. *Propiedades físico-químicas de los lubricantes*

Debido a que los MCIAs someten a los aceites lubricantes a unas exigencias muy elevadas se necesita que los lubricantes cumplan satisfactoriamente las exigencias propuestas a lo largo de toda la vida útil del aceite. De esta manera, un aceite que pierda la mayoría de sus propiedades con un uso relativamente bajo será considerado un aceite de baja calidad y bajas prestaciones. Por el contrario, un aceite con un uso elevado pero que mantiene sus características dentro de los límites establecidos será considerado un aceite de alta calidad.

Para determinar los valores de las propiedades se deben garantizar ensayos estandarizados a nivel internacional. A continuación, se presentan unas instituciones nacionales que han creado su propia normativa pero que están reconocidas internacionalmente.

- En Estados Unidos se encuentran las normas ASTM (*American Society for Testing and Materials*)
- En Reino Unido, las normas IP (*Institute of Petroleum*)
- En Alemania, las normas DIN (*Deutsches Institut für Normung*)

- A nivel internacional se definieron las normas ISO (*International Organisation for Standards*)

Las propiedades físico-químicas más importantes son la viscosidad, la detergencia y la dispersancia, el grado de acidez y basicidad, la densidad, el punto de niebla, el punto de congelación y el punto de inflamación.

2.2.2.1. Viscosidad

La viscosidad es la propiedad más importante de un aceite lubricante, tanto es así que, para clasificar los lubricantes, existen clasificaciones que se centran únicamente en este parámetro. Este es uno de los factores más importantes en la formación de la capa de lubricación.

La viscosidad se define como la resistencia de un fluido a fluir. Mientras que los fluidos con alta viscosidad presentan alta resistencia, los fluidos con baja viscosidad fluyen con baja resistencia. Además, la viscosidad estará afectada por otros factores como la presión o la temperatura y por la presencia de aditivos que modifiquen la composición y estructura del fluido.

La viscosidad se puede definir a través de la viscosidad dinámica o de la viscosidad cinemática. Como se detalla a continuación, ambas viscosidades están relacionadas a través de la densidad del fluido [8].

En primer lugar, la viscosidad dinámica es la resistencia de un fluido a fluir como se ha comentado con anterioridad. La resistencia es provocada por la fuerza de atracción molecular y el esfuerzo necesario para que el fluido fluya será función de esta resistencia. Esta definición es matemáticamente explicada como la relación entre la tensión de corte (esfuerzo necesario para mover una capa del fluido) y el gradiente de desplazamiento, como se puede observar en la ecuación **(1)**.

$$\mu = \frac{F/S}{dv/dz} = \frac{\tau}{dv/dz} \quad (1)$$

La unidad de medida de la viscosidad dinámica en el SI (Sistema Internacional) es el Pascal-segundo (Pa·s), mientras que en el CGS (Sistema Cegesimal) es el Poise (P). Habitualmente, es utilizado el centipoise (cP) en el campo de la lubricación.

En segundo lugar, la viscosidad cinemática es la resistencia de un fluido a fluir bajo la acción de la gravedad. En un fluido dentro de un capilar, la presión hidrostática es función de la densidad y el tiempo que tarda en fluir un volumen determinado es función de la viscosidad dinámica.

Debido a que la medición de la viscosidad dinámica requiere un mayor grado de precisión y dificultad, se opta generalmente por medir la viscosidad cinemática a través de la medición del tiempo requerido por un volumen determinado de fluido que atraviesa un tubo capilar por efecto de la gravedad.

De esta manera, a través de la ecuación **(2)** se relaciona a la viscosidad dinámica con la viscosidad cinemática.

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (2)$$

La unidad de medida en el SI (Sistema Internacional) para la viscosidad cinemática es el m^2/s , pero generalmente es utilizada la medida del CGS (Sistema Cegesimal) conocida como Stokes (St). Como las unidades de medición son muy pequeñas, se utiliza comúnmente el submúltiplo de centistokes (cSt), el cual es equivalente a las unidades de mm^2/s .

En el campo de la lubricación y el mantenimiento es fundamental conocer la curva de Stribeck para conocer el comportamiento de los lubricantes y como la fricción no es una función lineal de la carga, la viscosidad y la velocidad de arrastre del lubricante.

Mediante la curva de Stribeck se muestra la relación entre el coeficiente de fricción y el parámetro adimensional llamado número de Hersey, ecuación **(3)**, el cual es función de la viscosidad del fluido (η), de la velocidad (N) y de la carga por unidad de área (P).

$$Hersey\ number = \frac{\eta * N}{P} \quad (3)$$

En el eje de abscisas de la Figura 1 se encuentra dicho número de Hersey, mientras que en el eje de ordenadas se encuentra el coeficiente de fricción.

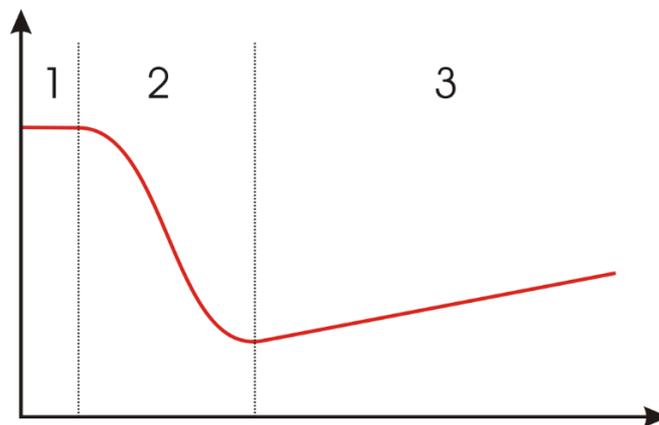


Figura 1: Curva de Stribeck

En la curva de Stribeck se encuentran tres zonas de lubricación bien diferenciadas.

La zona 1 o zona de lubricación límite es llamada de esta manera porque las superficies entran en contacto directo entre ellas, no existe apenas lubricante y la carga es soportada por las propias asperezas superficiales. Cabe destacar que es una zona de alta fricción.

La zona 2 o zona de lubricación mixta es llamada así porque existe un ligero contacto de aspereza y la carga se soporta mediante la combinación de dichas asperezas y el lubricante. Es un tipo de lubricación intermedia que generalmente se observa en los procesos de arranque y parada de la maquinaria.

La zona 3 o zona de lubricación hidrodinámica posee esta nomenclatura debido a que el contacto de las superficies es prácticamente insignificante y la carga se soporta fundamentalmente por la presión hidrodinámica. Las superficies están separadas por una gruesa capa de lubricante evitando así su contacto y reduciendo la fricción considerablemente.

Finalmente, otros parámetros característicos relacionados con la propiedad de la viscosidad son el Índice de Viscosidad y la viscosidad dinámica HTHS (*High Temperature High Shear*).

Debido a que la viscosidad está influenciada principalmente por la variación de temperatura y presión se definió un nuevo parámetro conocido como Índice de Viscosidad que relaciona la viscosidad del lubricante a una cierta temperatura con esa misma temperatura. De esta manera, se pretende adimensionalizar la propiedad de la viscosidad para la comparación entre lubricantes.

Para llevar a cabo el cálculo del Índice de Viscosidad, se hace uso de la ecuación (4) en la que L hace referencia a la viscosidad a 40°C de un aceite referencia con IV=0, H es la viscosidad a 100°C de un aceite referencia con IV=100 y U es la viscosidad a 40°C de la muestra de aceite que se desea conocer el Índice de Viscosidad. Este cálculo se encuentra detallado en el estándar ASTM D2270: *Standard Practice for Calculating Viscosity Index from Kinematic Viscosity at 40 and 100°C* [9].

$$IV = \frac{L - U}{L - H} * 100 \quad (4)$$

Cabe destacar que los valores de L y H se encuentran definidos en tablas de referencia ya realizadas. Por otra parte, se puede determinar que cuanto mayor sea el Índice de Viscosidad de un aceite, menor será la variación de viscosidad con la temperatura.

En cuanto a la viscosidad dinámica HTHS, ésta es llamada así porque se realiza en un ensayo a 150°C con una velocidad de cizallamiento de 10^6 s^{-1} , lo cual son unas condiciones muy similares a las que presenta el aceite cuando el motor está en funcionamiento y se puede extraer un valor de viscosidad significativo. Este valor es de gran importancia para el estudio de aceites de baja viscosidad y como puede derivar en un ahorro significativo de combustible.

2.2.2.2. Acidez/Basicidad

El aceite en condiciones de trabajo se somete a temperaturas elevadas y esfuerzos mecánicos. La combinación de ambos factores produce cambios en la composición del aceite y genera una degradación progresiva en el mismo. De esta manera, se originan sustancias que reducen la protección ofrecida por los aditivos dando lugar a disminuciones de viscosidad, corrosión en piezas metálicas o formaciones de lodos y barnices.

Medir la variación de acidez permite conocer el estado de la degradación del aceite, pero este grado de acidez aceptable debe ser considerado en función del tipo de aceite y las condiciones de uso del mismo.

Por otro lado, la basicidad o alcalinidad de los lubricantes se deben a los aditivos incluidos y tienen como principal objetivo neutralizar los ácidos producidos por la degradación oxidativa del mismo lubricante y de los subproductos de la combustión de los MCI que pueden llegar a combinarse con el lubricante tanto en estado gaseoso como en estado líquido.

El grado de basicidad también es un indicativo del estado de degradación del aceite, pero en este caso se recomienda que las reservas alcalinas se mantengan lo más elevadas posibles. Actualmente, la presencia de azufre en los combustibles se ha visto

reducidas significativamente por lo que no se esperan problemas graves o acusados derivados del agotamiento anormal de las reservas alcalinas.

El número de neutralización es la cantidad de ácido o base necesario para neutralizar los ácidos o bases en una muestra de un gramo de aceite. Por una parte, el TAN (*Total Acid Number*) se define como la cantidad de hidróxido potásico (KOH) en miligramos necesaria para neutralizar los ácidos presentes en 1 gramo de aceite. Mientras que, el TBN (*Total Base Number*) es la cantidad de ácido clorhídrico (HCl) en miligramos necesaria para neutralizar los componentes alcalinos en 1 gramo de aceite.

2.2.2.3. Detergencia y Dispersancia

La detergencia es la capacidad del lubricante de eliminar los residuos que se acumulan a lo largo del sistema, generalmente en forma de lodos.

Esta propiedad depende de la base del aceite, pero sobretodo de los aditivos detergentes utilizados en el mismo. La capacidad detergente se reduce con la vida útil del aceite al aparecer sustancias acidas y oxidativas que deben ser neutralizadas.

De esta manera, los aceites con menor viscosidad y menor residuos carbonosos tienen mejor capacidad detergente.

La dispersancia es la capacidad del lubricante para mantener a los residuos dispersos y evitar que se acumulen. Esta característica depende fundamentalmente de la base del aceite y se pierde con el tiempo por la presencia de contaminantes en el lubricante.

Tanto la detergencia como la dispersancia se encuentran muy ligadas en términos de aditivación. Los aditivos generalmente utilizados son fenatos sulfonizados sobrebásicos que presentan una elevada alcalinidad, proporcionando propiedades antioxidantes e inhibidores de corrosión.

2.2.2.4. Densidad

La densidad se define como la relación entre la masa y el volumen de un fluido y se expresa según las unidades del SI (Sistema Internacional) en kg/m³.

Adicionalmente, se utiliza también la unidad de medida desarrollada por el *American Petroleum Institute* que define la escala de medida en grados API, en la cual un descenso en el peso específico se relaciona con un aumento de los grados API de la manera que se puede observar en la ecuación (5).

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

Cabe destacar que esta unidad de medida toma como referencia los valores medido a 60°F o lo que es lo mismo, 15°C.

2.2.2.5. Punto de niebla (*Cloud point*)

El punto de niebla, también conocido como punto de enturbiamiento, es la temperatura a la cual se separan las parafinas junto con otras partículas en solución del aceite y se cristalizan. Este efecto influye negativamente en la transparencia del aceite adquiriéndose un aspecto más turbio.

Esta propiedad es de significativa importancia en los aceites que operan a temperaturas ambientes muy bajas porque se dificulta la bombeabilidad y el aceite tiende a formar obstrucciones en filtros y pequeños orificios.

2.2.2.6. Punto de congelación (*Pour point*)

El punto de congelación es la menor temperatura a la cual el aceite puede fluir por gravedad mientras se va enfriando. Generalmente, esta temperatura es expresada en múltiplos de 3°C.

Los aceites lubricantes de motor presentan una temperatura del punto de congelación mucho menor que la temperatura ambiente del lugar donde van a ser utilizados. De esta manera se garantiza que durante el arranque en frío del motor el aceite fluya por el sistema.

2.2.2.7. Punto de inflamación (*Flash point*)

El punto de inflamación es la mínima temperatura (expresada habitualmente en °C) a la cual un aceite comienza a emitir vapores suficientes como para inflamarse al aplicar una fuente de energía externa.

El punto de inflamación en aceites lubricantes de motor se encuentra en niveles que no deben ofrecer riesgos potenciales de inflamación. Por este motivo, generalmente el valor de dicho parámetro se sitúa por encima de 200°C.

Esta propiedad está íntimamente relacionada con la volatilidad de manera que un punto de inflamación menor se relaciona con una volatilidad mayor y, en consecuencia, mayor tendencia de inflamación. Los aceites con un punto de inflamación mayor son considerados aceites de mayor calidad.

Además, una reducción en el punto de inflamación puede ser debido a presencia de combustible en el lubricante. Los aceites poco volátiles, acusan en mayor medida dicha contaminación con combustible.

2.2.3. Clasificación de los lubricantes

Los aceites lubricantes utilizados en automoción se clasifican de diversas maneras siendo las más comunes la clasificación en función de la viscosidad, de la cual la clasificación SAE (*Society of Automotive Engineers*) es la más representativa y la clasificación por calidad o comportamiento, entre las cuales se encuentran las clasificaciones API (*American Petroleum Institute*) y ACEA (*Asociación de Constructores Europeos de Automóviles*).

2.2.3.1. Clasificación SAE

La clasificación SAE, tal y como se ha comentado con anterioridad, es una clasificación basada en la viscosidad del lubricante. La creación de ésta data de principios de siglo XX y, actualmente, a través de la norma SAE J300 observada en la Tabla 2 se define el grado SAE, el cual relaciona la viscosidad con la temperatura [10].

La clasificación está basada en la acotación de la viscosidad en dos direcciones diferentes. Por una parte, los grados de “invierno” donde el principal requerimiento es el funcionamiento a bajas temperaturas (condiciones de arranque). Por otra parte, el comportamiento a altas temperaturas (condiciones de operación) definido como grados de “verano”. El rango de viscosidad se indica mediante dos números con valores más alto señalando mayores valores de viscosidad.

Los aceites monogrado se definen como aquellos que cumplen únicamente con el grado SAE de su designación. La viscosidad SAE en aceites monogrado se expresa como SAE XX (W) donde se utilizan los numero definidos únicamente, y en caso de bajas temperaturas la letra W (*Winter*).

Los aceites multigrado cumplen simultáneamente con las especificaciones de dos grados SAE diferentes, a altas y bajas temperaturas. En los aceites multigrado la viscosidad SAE se expresa como SAE XXWYY donde XX es el grado de invierno y YY es el grado de verano.

Grado SAE **Viscosidad a bajas temperaturas** **Viscosidad a altas temperaturas**

	<i>Cranking</i>	Bombeabilidad	Visc. Cinemática		HTHS
	@ Temp (°C) Máx (cP)	@ Temp (°C) Máx (cP)	@100 °C Mín (cSt)	Máx (cSt)	@150 °C Mín (cP)
0W	6200 @ -35	60000 @ -40	3,8	-	-
5W	6600 @ -30	60000 @ -35	3,8	-	-
10W	7000 @ -25	60000 @ -30	4,1	-	-
15W	7000 @ -20	60000 @ -25	5,6	-	-
20W	9500 @ -15	60000 @ -20	5,6	-	-
25W	13000 @ -10	60000 @ -15	9,3	-	-
8	-	-	4,0	<6,1	1,7
12	-	-	5,0	<7,1	2,0
16	-	-	6,1	<8,2	<2,3
20	-	-	6,9	<9,3	2,6
30	-	-	9,3	<12,5	2,9
40	-	-	12,5	<16,3	3,5*
40	-	-	12,5	<16,3	3,7**
50	-	-	16,3	<21,9	3,7
60	-	-	21,9	<26,1	3,7

*) Grados 0W40, 5W40 y 10W30

**) Grados 15W40, 20W40. 25W40 y 40

Tabla 2: SAE J300_201501 - Engine Oil Viscosity Classification

2.2.3.2. Clasificación API

La clasificación API es una clasificación basada en la calidad o comportamiento del lubricante como se ha definido anteriormente.

La clasificación divide en dos grandes grupos a los aceites de motor, la categoría S para motores de gasolina y la categoría C para motores diésel [11]. Dentro de esta primer gran división se añade una segunda letra que hace referencia a las especificaciones concretas de servicio, comenzando con las menores exigencias para la letra A y continuando alfabéticamente en función que las exigencias sean mayores como se observa en la Tabla 3.

A medida que las exigencias son mayores y se desarrollan nuevas categorías las clasificaciones previas se quedan obsoletas. Por este motivo, esta clasificación está más basada en las exigencias de los nuevos motores que en las características propias del lubricante.

Motores Gasolina			Motores Diésel		
Categoría	Año	Vigencia	Categoría	Año	Vigencia
SA	1900	Obsoleto	CA	1900	Obsoleto
SB	1930	Obsoleto	CB	1930	Obsoleto
SC	1964	Obsoleto	CC	1955	Obsoleto
SD	1968	Obsoleto	CD	1979	Obsoleto
SE	1972	Obsoleto	CE	1988	Obsoleto
SF	1980	Obsoleto	CF	1991	Obsoleto
SG	1989	Obsoleto	CF-4	1993	Obsoleto
SH	1992	Obsoleto	CG-4	1995	Obsoleto
SJ	1997	Obsoleto	CH-4	1999	Vigente
SL	2001	Vigente	CI-4	2002	Vigente
SM	2005	Vigente	CJ-4	2005	Vigente
SN	2010	Vigente	CK-4	2017	Vigente
			FA-4	2017	Vigente

Tabla 3: Desarrollo y vigencia de las clasificaciones API

2.2.3.3. Clasificación ACEA

La clasificación ACEA, al igual que la clasificación API, también es una clasificación basada en la calidad o comportamiento de los lubricantes.

Esta clasificación divide a los lubricantes en tres grandes categorías, detalladas en la Tabla 4, Tabla 5 y Tabla 6, dentro de las cuales existen subcategorías diferentes [12].

A/B: Gasoline and Diesel Engine Oils – “High SAPS”	
A1/B1	Category is removed with these Oil Sequences.
A3/B3	Stable, stay-in-grade Engine Oil intended for use in Passenger Car & Light Duty Van Gasoline & Diesel Engines with extended drain intervals where specified by the Engine Manufacturer, and for severe operating conditions as defined by the Engine Manufacturer.
A3/B4	Stable, stay-in-grade Engine Oil intended for use at extended Drain Intervals in Passenger Car & Light Duty Van Gasoline & DI Diesel Engines, but also suitable for applications described under A3/B3.
A5/B5	Stable, stay-in-grade Engine Oil intended for use at extended Drain Intervals in Passenger Car & Light Duty Van Gasoline & Diesel Engines designed to be capable of using Low Viscosity Oils with HTHS Viscosity of 2.9 to 3.5 mPa·s. These Oils are unsuitable for use in certain Engines - consult vehicle-OEM's owner's manual/handbook in case of doubt.

Tabla 4: Gasoline and Light Duty Diesel Engine Oils

C: Catalyst & PF compatible Engine Oils for Gasoline & Diesel Engines – “Low SAPS”	
C1	Stable, stay-in-grade Engine Oil with Lowest SAPS-Level, intended for use as catalyst compatible Oil at extended Drain Intervals in Vehicles with all Types of modern Aftertreatment Systems and High Performance Passenger Car & Light Duty Van Gasoline & DI Diesel Engines that are designed to be capable of using Low Viscosity Oils with a minimum HTHS Viscosity of 2.9 mPa·s.
C2	Stable, stay-in-grade Engine Oil with Mid SAPS-Level, intended for use as catalyst compatible Oil at extended Drain Intervals in Vehicles with all Types of modern Aftertreatment Systems and High Performance Passenger Car & Light Duty Van Gasoline & DI Diesel Engines that are designed to be capable of using Low Viscosity Oils with a minimum HTHS Viscosity of 2.9 mPa·s.
C3	Stable, stay-in-grade Engine Oil with Mid SAPS-Level, intended for use as catalyst compatible Oil at extended Drain Intervals in Vehicles with all Types of modern Aftertreatment Systems and High Performance Passenger Car & Light Duty Van Gasoline & DI Diesel Engines that are designed to be capable of using Oils with a minimum HTHS Viscosity of 3.5 mPa·s.
C4	Stable, stay-in-grade Engine Oil with Low SAPS-Level, intended for use as catalyst compatible Oil at extended Drain Intervals in Vehicles with all Types of modern Aftertreatment Systems and High Performance Passenger Car & Light Duty Van Gasoline & DI Diesel Engines that are designed to be capable of using Oils with a minimum HTHS Viscosity of 3.5 mPa·s.
C5	Stable, stay-in-grade Engine Oil with Mid SAPS-Level, for further improved Fuel Economy, intended for use as catalyst compatible Oil at extended Drain Intervals in Vehicles with all Types of modern Aftertreatment Systems and High Performance Passenger Car & Light Duty Van Gasoline & DI Diesel Engines that are designed to be capable and OEM-approved for use of Low Viscosity Oils with a minimum HTHS Viscosity of 2.6 mPa·s.

Tabla 5: Catalyst compatible oils for Gasoline and Light Duty Diesel Engines with Aftertreatment devices

E: Heavy Duty Diesel Engine Oils	
E4	Stable, stay-in-grade oil providing excellent control of piston cleanliness, wear, soot handling and lubricant stability. It is recommended for highly rated diesel engines meeting Euro I, Euro II, Euro III, Euro IV and Euro V emission requirements and running under very severe conditions, e.g. significantly extended oil drain intervals according to the manufacturer's recommendations. It is suitable for engines without particulate filters, and for some EGR engines and some engines fitted with SCR NOx reduction systems. However, recommendations may differ between engine manufacturers so driver manuals and/or dealers shall be consulted if in doubt.
E6	Stable, stay-in-grade oil providing excellent control of piston cleanliness, wear, soot handling and lubricant stability. It is recommended for highly rated diesel engines meeting Euro I, Euro II, Euro III, Euro IV, Euro V and Euro VI emission requirements and running under very severe conditions, e.g. significantly extended oil drain intervals according to the manufacturer's recommendations. It is suitable for EGR engines, with or without particulate filters, and for engines fitted with SCR NOx reduction systems. E6 quality is strongly recommended for engines fitted with particulate filters and is designed for use in combination with low sulphur diesel fuel. However, recommendations may differ between engine manufacturers so driver manuals and/or dealers shall be consulted if in doubt.
E7	Stable, stay-in-grade oil providing effective control with respect to piston cleanliness and bore polishing. It further provides excellent wear control, soot handling and lubricant stability. It is recommended for highly rated diesel engines meeting Euro I, Euro II, Euro III, Euro IV and Euro V emission requirements and running under severe conditions, e.g. extended oil drain intervals according to the manufacturer's recommendations. It is suitable for engines without particulate filters, and for most EGR engines and most engines fitted with SCR NOx reduction systems. However, recommendations may differ between engine manufacturers so driver manuals and/or dealers shall be consulted if in doubt.
E9	Stable, stay-in-grade oil providing effective control with respect to piston cleanliness and bore polishing. It further provides excellent wear control, soot handling and lubricant stability. It is recommended for highly rated diesel engines meeting Euro I, Euro II, Euro III, Euro IV, Euro V and Euro VI emission requirements and running under severe conditions, e.g. extended oil drain intervals according to the manufacturer's recommendations. It is suitable for engines with or without particulate filters, and for most EGR engines and for most engines fitted with SCR NOx reduction systems. E9 is strongly recommended for engines fitted with particulate filters and is designed for use in combination with low Sulphur diesel fuel. However, recommendations may differ between engine manufacturers so driver manuals and/or dealers should be consulted if in doubt

Tabla 6: Heavy Duty Diesel Engines

Dentro de cada normativa se incluye una numerosa serie de diferentes ensayos relacionados con las propiedades del aceite. Cada uno de los ensayos propone un límite que el aceite ensayado debe superar.

3. MANTENIMIENTO PREDICTIVO BASADO EN LA CONDICIÓN DEL ACEITE (*OIL CONDITION MONITORING*) EN MCIA

El análisis del aceite usado es una técnica muy empleada que permite conocer y evaluar el estado del motor y del lubricante [13]. La técnica, basada en el mantenimiento predictivo, consiste en tomar muestras de lubricante periódicamente para analizarlas posteriormente y clasificar los resultados en función de los parámetros de degradación, contaminación y desgaste.

3.1. Degradación

La degradación del aceite lubricante es un proceso a través del cual se reduce la capacidad del lubricante para realizar las funciones para las cuales ha sido diseñado (tareas de lubricación, refrigeración, protección, limpieza y sellado) [14]. Las condiciones internas del motor como las elevadas temperaturas, las grandes velocidades de cizallamiento, el ambiente corrosivo y la contaminación originan la alteración de las propiedades físicas y químicas del aceite. A continuación, se detallan los parámetros de estudio de la degradación del aceite:

- Viscosidad

Como se ha comentado anteriormente, la viscosidad es la propiedad más importante de un aceite lubricante. Por ello, se trata de un parámetro básico que se debe monitorizar, pero ofrece un tipo de información que debe ser complementada mediante el estudio de otros parámetros. A través de la Tabla 7 se muestran los efectos característicos de la viscosidad y es posible detectar degradación del lubricante o anomalías en el funcionamiento del motor realizando un seguimiento en la evolución del comportamiento.

	<i>Descenso de viscosidad</i>	<i>Aumento de viscosidad</i>
<i>Cambios en la estructura del aceite</i>	-Ruptura de las moléculas -Degradación de aditivos mejoradores del Índice de Viscosidad	-Polimerizaciones -Oxidación -Pérdidas evaporación -Formación de lodos y lacas
<i>Contaminación</i>	-Combustible -Mezcla de aceites con menor viscosidad -Disolventes	-Agua -Espumas -Insolubles y materia carbonosa -Mezcla con aceites de mayor viscosidad

Tabla 7: Efectos característicos sobre la viscosidad cinemática

Tras conocer las causas y los efectos de las variaciones de viscosidad del aceite, se pueden analizar los problemas que dicha incorrecta lubricación puede suponer sobre el motor.

Ante un valor de viscosidad excesivamente alto se pueden encontrar las siguientes situaciones:

- Mayor generación de calor, mayor oxidación del aceite y formación de lodos y barnices.
- Cavitación
- Flujo inadecuado a las zonas de lubricación
- Batido de aceite en cojinetes
- Pérdidas por mayor consumo de energía
- Pobres características de bombeabilidad a baja temperatura

Si el valor de viscosidad es excesivamente bajo se pueden dar las siguientes situaciones:

- Pérdida de película de aceite, lubricación límite, fricción y excesivo desgaste
- Alta fricción mecánica y pérdida de energía, generación de calor y oxidación
- Fugas internas y externas
- Incremento de la sensibilidad a la contaminación por partículas
- Fallo de la película lubricante en condiciones severas

Las variaciones de viscosidad de deben estudiar junto a variaciones de otros parámetros para cuantificar adecuadamente el nivel de degradación del aceite.

- Acidez/Basicidad

El contenido de ácido es un parámetro relacionado, entre otras causas, con el contenido de azufre de los combustibles y es por ello que se suele utilizar la medida de la reserva alcalina para el mantenimiento. Ya que actualmente los combustibles carecen de azufre, la medición del contenido de ácido permite conocer otros aspectos de la degradación del lubricante y del desgaste del motor. Los aditivos detergentes y dispersantes pueden modificar el valor del parámetro, por ello, es un parámetro de alta utilidad en los motores de gas ya que los niveles dichos aditivos son menores. Esto es debido a que la combustión de los motores de gas es más limpia que la de los motores diésel.

La reserva alcalina es utilizada para neutralizar los ácidos producidos en la combustión y la oxidación debido a altas temperaturas. Dicha reserva alcalina debe ser mayor cuanto mayor sea el contenido de azufre en el combustible, ya que la cantidad de ácidos formados también será mayor.

Cabe destacar que el valor de acidez nunca debe superar al de reserva alcalina y se recomienda que la reserva alcalina no decaiga por debajo del 50% del valor de referencia para un aceite nuevo.

- Oxidación y Nitración

La oxidación y la nitración son otros parámetros básicos para la monitorización correcta del estado del aceite junto con la viscosidad. La evolución de dichos parámetros puede determinar posibles problemas internos en el motor.

La oxidación se debe a la degradación del aceite debido a la gran demanda térmica que soporta. Este fenómeno contribuye a la acidificación del aceite y al consumo de la reserva alcalina. Cuando la oxidación es prolongada en el tiempo, la viscosidad del aceite aumenta y adopta una actuación corrosiva debido a la acidificación. Generalmente, la oxidación del aceite se divide en tres etapas bien diferenciadas.

La primera etapa (denominada periodo de inhibición) mantiene las propiedades prácticamente estables y la oxidación es mínima. Se trata de una fase afectada principalmente por la demanda térmica y por el remanente de aditivos antioxidantes que termina cuando estos se agotan.

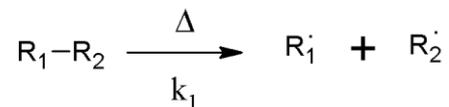


Figura 2: Primera etapa de oxidación

La segunda etapa (llamada etapa de rotura) tiene un efecto más pronunciado sobre el ratio de oxidación debido al agotamiento de los aditivos antioxidantes. Este efecto se observa en la composición del aceite y en la concentración de los inhibidores de oxidación naturales.

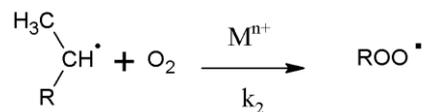


Figura 3: Segunda etapa de oxidación

La tercera etapa se caracteriza por una lenta oxidación que se debe a la elevada viscosidad del aceite, el cual limita el acceso de aire u oxígeno al mismo.

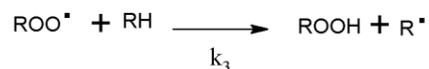


Figura 4: Tercera etapa de oxidación

La nitración es resultado de la reacción entre el aceite y los óxidos de nitrógeno generados en el proceso de combustión. La nitración produce barnices y lacas que suponen un espesamiento del aceite. El ratio de nitración también se ve afectado por la presencia de aditivos antioxidantes.

Observando la evolución de los parámetros de oxidación y nitración frente a la viscosidad se puede confirmar el proceso de espesamiento del aceite. Además, existe cierta correlación entre los resultados de oxidación y de nitración sufridos por el aceite, ya que son fenómenos íntimamente relacionados [15].

- Nivel de aditivos

Los aditivos utilizados en el aceite varían en función del fabricante y del producto, además, el paquete de aditivación está enfocado al uso específico del aceite.

En términos generales, el monitorizado del nivel de aditivación resulta de utilidad para controles puntuales en determinadas situaciones. Los elementos metálicos que forman parte del paquete de aditivos son el zinc, fósforo, calcio, sodio, bario, boro y magnesio, que en función de los requerimientos del aceite son mezclados en diferentes concentraciones. Cabe destacar que el dialquilditiofosfato de zinc (ZDDP) es el aditivo antidesgaste más importante, el cual está basado en zinc y fósforo.

Para la medición de los parámetros de degradación descritos previamente se han utilizado las técnicas analíticas mostradas en la Tabla 8. Cabe destacar la existencia de técnicas analíticas diferentes a la empleada en la medición de dichos parámetros, tal y como se desarrolla en el siguiente capítulo.

Parámetro	Técnica analítica empleada
<i>Viscosidad cinemática</i>	Viscosímetro
<i>TAN</i>	Valoración termométrica
<i>TBN</i>	Valoración termométrica
<i>RUL Number</i>	Voltamperometría lineal de barrido
<i>Oxidación</i>	Espectrometría infrarroja
<i>Nitración</i>	Espectrometría infrarroja
<i>Aditivos amínicos</i>	Espectrometría infrarroja
<i>Aditivos antidesgaste</i>	Espectrometría infrarroja
<i>Aditivos metálicos</i>	Espectrometría ICP-OES

Tabla 8: Parámetros de degradación y técnica analítica empleada

3.2. Contaminación

La contaminación del aceite lubricante es la alteración nociva de la pureza del lubricante debido a la presencia de agentes externos ajenos a la formulación del lubricante, sin importar su origen. Las principales fuentes de contaminación de los MCIA se enumeran a continuación:

- Combustible y subproductos de combustión.

La contaminación por combustible se suele dar en situaciones de arranque en frío y ciclos cortos de funcionamiento. Además de este tipo de contaminación, en el proceso de combustión se generan gases que pasan al cárter a través de los segmentos (este fenómeno se denomina *blow-by* en inglés). Dichos gases se mezclan con los vapores del aceite generando un aumento de la acidez en el aceite que debe ser neutralizada. Además, en los motores diésel y debido al tipo de combustible empleado, la aparición del hollín (*soot* en su término en inglés) es otro tipo de contaminación muy característico.

- Agua

La contaminación con agua se debe generalmente a una fuga del sistema de refrigeración ya que la composición de los anticongelantes empleados en MCIA es principalmente agua y etilenglicol, el cual es un aditivo que también colabora en la degradación del aceite. Además, la condensación del vapor como producto de la combustión puede originar contaminación con agua.

- Polvo atmosférico

Otra causa característica de contaminación se debe a la entrada de polvo atmosférico al motor a través del sistema de admisión, debido a filtros ineficientes o conductos con fugas o roturas. La presencia de elementos abrasivos en el polvo atmosférico como es el silicio genera la abrasión de los elementos mecánicos con su respectivo desgaste.

- Partículas y óxidos metálicos

Debido a la fricción ocurrida en los elementos mecánicos del MCI lubricados con aceite, se pueden encontrar diferentes metales provenientes de esta interacción de los elementos mecánicos. Este tipo de contaminación requiere de un apartado propio destacando únicamente el desgaste de los elementos.

Los parámetros de contaminación han sido medidos con las técnicas analíticas mostradas a través de la Tabla 9. En el siguiente capítulo se desarrollan dichas técnicas empleadas, así como las alternativas posibles.

Parámetro	Técnica analítica empleada
Contenido de agua	Espectrometría infrarroja
Contenido de glicol	Espectrometría infrarroja
Soot	Espectrometría infrarroja
Dilución de combustible	Espectrometría infrarroja
Silicio	Espectrometría ICP-OES
Sodio	Espectrometría ICP-OES
Bario	Espectrometría ICP-OES
Boro	Espectrometría ICP-OES
Calcio	Espectrometría ICP-OES
Zinc	Espectrometría ICP-OES
Fósforo	Espectrometría ICP-OES
Magnesio	Espectrometría ICP-OES
Molibdeno	Espectrometría ICP-OES

Tabla 9: Parámetros de contaminación y técnica analítica empleada

3.3. Desgaste

Se entiende desgaste dentro del ámbito de la tribología como aquellos fenómenos que se manifiestan con una pérdida de materia en una pieza sometida a rozamiento. Una de las funciones principales del lubricante es reducir el rozamiento entre las partes mecánicas y reducir el desgaste al mínimo posible [16].

Además de la lubricación, otros factores como la tecnología del motor y sus piezas, la composición de los elementos y las condiciones de funcionamiento, entre otros, afectan al desgaste. En consecuencia, un desgaste excesivo puede derivar consecuencias como incidencias sobre la vida útil del vehículo, pérdidas de potencia, consumo excesivo e incluso avería total del motor.

Una vez definido el desgaste y las consecuencias que tiene, se describen a continuación los tipos de desgaste que se pueden encontrar en un motor.

- Desgaste corrosivo

Algunos productos generados en la reacción de combustión del motor presentan un carácter ácido que, al mezclarlos con agua, puede hacerlos muy agresivos frente a los metales. Además, a través de la degradación del aceite se pueden originar óxidos y ácidos muy corrosivos.

- Desgaste abrasivo

Al desplazarse partículas duras o superficies rugosas sobre otra superficie más suave se produce un desprendimiento de materia. La intensidad de la abrasión es función de las durezas relativas de las dos superficies y del abrasivo. Si ambas superficies tienen una dureza semejante, la superficie más blanda sufrirá la abrasión. Por otra parte, si la diferencia en la dureza entre ambas superficies es relativamente grande, las partículas abrasivas se incrustarán en la superficie blanda y, si una de estas partículas sumergidas emerge, será la superficie dura la cual sufrirá el desgaste.

- Desgaste por fatiga superficial (*pitting*)

La fatiga superficial se produce sobretodo en mecanismos donde interviene el rozamiento de rodamientos. La repetición cíclica de esfuerzos máximos producidos debajo de la superficie repercute en grietas profundas de fatiga y, finalmente, en la aparición de picaduras y escamas.

Otro tipo de fatiga superficial se debe a la fatiga térmica de dos superficies duras y frágiles sometidas a un elevado gradiente térmico. Se observa principalmente en superficies con un deslizamiento puro a elevada velocidad. Este desgaste se presenta con la aparición de grietas en dirección perpendicular a la de deslizamiento.

- Desgaste erosivo

Este tipo de desgaste, muy similar al desgaste abrasivo, se produce en superficies metálicas que están en contacto con un fluido que se desplaza a gran velocidad con partículas duras. La principal diferencia que presenta respecto al desgaste abrasivo es que el mecanismo de desgaste se origina por la energía cinética almacenada en las partículas contenidas en el fluido y su impacto sobre la superficie, provocando arranque de materia.

- Desgaste adhesivo (*scuffing*)

El desgaste adhesivo está presente en todas las superficies con rozamiento cuando no están separadas completamente por una película de lubricante. Este tipo de desgaste, generalmente el más importante y menos deseado, se debe a las asperezas superficiales presentes a escala microscópica en todas las superficies. Cuando existe un defecto de lubricante, el contacto entre las superficies se efectúa a través de una serie de picos que soportan una presión muy elevada produciendo deformaciones plásticas en el metal hasta que la superficie deformada sea capaz de soportar la carga.

Los enlaces intermetálicos son muy fuertes (casi soldaduras) en el nivel de las superficies de contacto debido a las elevadas presiones. El desgaste es consecuencia del esfuerzo de rozamiento necesario para romper dichas soldaduras y se produzca desplazamiento relativo entre las superficies. Dependiendo de diversos factores, el proceso puede mejorar eliminando progresivamente las asperezas o degradar un mecanismo autoacelerado provocando el gripado del mismo.

En la Tabla 10 se presentan los diversos elementos de los MCIA con el tipo de desgaste más genérico asociado.

Parte	Adhesivo	Corrosivo	Abrasivo	Fatiga	Erosivo
<i>Camisa, segmentos, pistones</i>	X	X	X		
<i>Levas, empujadores, balancines</i>	X	X	X	X	
<i>Vástago-guía de válvula</i>	X		X		
<i>Apoyo-asiento de válvula</i>			X		
<i>Engranajes de distribución</i>	X		X	X	
<i>Muñones</i>		X	X	X	X
<i>Cojinetes</i>		X	X	X	X
<i>Bomba de aceite</i>	X		X	X	
<i>Bomba de combustible</i>	X		X	X	
<i>Bomba de inyección</i>	X		X	X	

Tabla 10: Tipos genéricos de desgaste en diversas partes de un MCIA

Como se ha comentado con anterioridad, el lubricante está en contacto con los elementos que generan fricción en el interior del MCIA y se depositan todas las partículas en él. Analizando la concentración de estas partículas se puede determinar con antelación los fallos en los diferentes elementos del motor.

Para analizar la concentración de partículas en este Trabajo se ha hecho uso de la técnica analítica de espectrometría ICP-OES. Esta técnica es recomendable emplearla junto a los resultados obtenidos de las diferentes técnicas empleadas para realizar una valoración crítica.

A través de la Tabla 11 se puede observar una serie de elementos químicos presentes en los diferentes elementos mecánicos y sistemas de los MCIA con sus respectivos orígenes. De esta manera, conociendo la concentración anómala detectada a través de las técnicas analíticas, es posible conocer la procedencia y detectar los posibles fallos antes de que sucedan.

Elemento	Símbolo	Origen principal
<i>Plata</i>	Ag	Cojinetes, válvulas
<i>Aluminio</i>	Al	Cojinetes, pistones, bloque motor, polvo ambiente
<i>Bario</i>	Ba	Aditivo del lubricante
<i>Boro</i>	B	Aditivo del lubricante
<i>Calcio</i>	Ca	Aditivo del lubricante
<i>Cadmio</i>	Cd	Aleaciones especiales, válvulas, segmentos, camisas, pistones, inhibidores de corrosión
<i>Cromo</i>	Cr	Camisa, válvulas, cojinetes
<i>Cobre</i>	Cu	Cojinetes
<i>Hierro</i>	Fe	Cigüeñal, cilindros, engranajes, cadenas, levas, balancines y segmentos
<i>Magnesio</i>	Mg	Aditivo del lubricante
<i>Manganeso</i>	Mn	Segmentos
<i>Molibdeno</i>	Mo	Aditivo del lubricante
<i>Sodio</i>	Na	Aditivo del lubricante
<i>Níquel</i>	Ni	Cilindros
<i>Fósforo</i>	P	Aditivo del lubricante
<i>Plomo</i>	Pb	Cojinetes
<i>Silicio</i>	Si	Polvo atmosférico
<i>Estaño</i>	Sn	Cojinetes
<i>Titanio</i>	Ti	Aleaciones especiales
<i>Vanadio</i>	V	Aleaciones especiales
<i>Zinc</i>	Zn	Aditivo del lubricante

Tabla 11: Elementos químicos y origen de los mismos

4. TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE LUBRICANTE EN MCIA

4.1. Viscosidad cinemática

La viscosidad es un parámetro de los fluidos que determina el movimiento de éste cuando es sometido a unas condiciones específicas. Las fuerzas intermoleculares y la estructura química del fluido están íntimamente relacionadas con la viscosidad del mismo. A un mayor nivel de interacción molecular entre las moléculas del fluido, un mayor nivel de valor de viscosidad, mientras que valores bajos de interacción se relacionan con menores niveles de viscosidad. Variaciones en condiciones externas como la presión y la temperatura y en factores internos como la composición del aceite influyen sobre el valor de viscosidad.

Para la medición del valor de viscosidad existen diferentes alternativas como son los viscosímetros de bolas, los viscosímetros semiautomáticos y los viscosímetros capilares y rotacionales. Generalmente, en aplicaciones relacionadas con la ingeniería, se hace un mayor uso de los viscosímetros capilares cuando se trata de la medición de fluidos newtonianos y viscosímetros rotacionales en el caso de fluidos no newtonianos.

Como se ha explicado con anterioridad, la viscosidad esta fundamentalmente condicionada por variaciones de temperatura, por ello se debe realizar el proceso de medición en un entorno que controle la temperatura en todo momento. Una de las formas más extendidas de controlar y garantizar un valor específico de temperatura controlada y homogénea es con el uso de baños termostáticos (Figura 5) donde los viscosímetros capilares son sumergidos. De esta manera, se garantiza que la temperatura en todo el viscosímetro capilar es la deseada y se pueden realizar las mediciones de viscosidad, las cuales son normalmente a 40°C y 100°C.



Figura 5: Baño termostático con control de temperatura digital

En el desarrollo de este trabajo se han empleado viscosímetros capilares que, como refleja la norma ASTM D445: *Standard Test Method for Kinematic Viscosity of Transparent and Opaque Liquids (and Calculation of Dynamic Viscosity)* [17], basan su funcionamiento en el principio de fluencia de un volumen específico de fluido a través de una capilar que tiene controlada su temperatura debido a la inmersión en un baño térmico. Es posible determinar el tiempo que necesita un fluido para fluir por parte de un volumen determinado gracias a la aplicación de la Ley de Poiseuille para flujos constantes y viscosos en un tubo.

Hay variedad en el tipo de viscosímetros capilares en función del tipo de fluido que se pretende ensayar, entre los que destacan el viscosímetro capilar Ostwald, Cannon-Fenske y Ubbelohde entre otros, pudiéndose utilizar éstos para la medición de fluidos transparentes. En el desarrollo de este trabajo se ha requerido únicamente el viscosímetro capilar Cannon-Fenske de flujo inverso para fluidos opacos que se muestra en la Figura 6.



Figura 6: Viscosímetro capilar Canon-Fenske para fluidos opacos

4.2. Valoración del índice TAN/TBN

El número de neutralización del grado de acidez se define a través del parámetro conocido como índice de acidez total o TAN (*Total Acid Number*), el cual representa la cantidad equivalente de hidróxido de potasio (KOH) requerida para neutralizar el contenido ácido en un gramo de muestra de aceite.

Mientras que, por otra parte, el grado de basicidad es expresado mediante el parámetro llamado índice de basicidad total o TBN (*Total Base Number*), definido por la cantidad equivalente de hidróxido de potasio (KOH) necesaria para neutralizar el contenido alcalino de un gramo de muestra.

A través de la observación del aumento de la acidez y de la disminución de la basicidad, se pueden estudiar los grados de degradación y contaminación al analizar la tendencia de los valores de los aceites usados frente a los nuevos de referencia.

Existen diversas técnicas analíticas para la determinación de los índices TAN y TBN como pueden ser las técnicas de colorimetría, potenciometría o termometría entre otras. Dichas técnicas son ampliamente empleadas en el ámbito de la ingeniería, pero son utilizadas en función del grado de precisión que se desee obtener.

Una de las técnicas más extendidas para cuantificar la concentración de acidez y basicidad del fluido es la valoración termométrica. Esta técnica es ampliamente empleada debido a su alto nivel de precisión y, por ello, es utilizada en el desarrollo de este trabajo a través del equipo 859 Titrotherm de Metrohm, mostrado en la Figura 7.



Figura 7: Equipo 859 Titrotherm de Metrohm

Por una parte, mediante el estándar ASTM D8045: *Standard Test Method for Acid Number of Crude Oils and Petroleum Products by Catalytic Thermometric Titration* [18] se ha realizado la valoración termométrica para determinar el índice de acidez.

En cuanto a la obtención del grado de basicidad, este se ha logrado a través del protocolo establecido en *Application Bulletin 405/2 EN: Determination of the total base number in petroleum products* [19] en el apartado *Thermometric determination*, páginas 6 y 7, de Metrohm.

En el procedimiento de medida, 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.

4.3. Voltamperometría lineal de barrido

La voltamperometría lineal de barrido es una técnica analítica en la cual se le aplica un potencial a un compuesto para reducirlo u oxidarlo. En el método voltamperométrico se obtiene información del analito mediante la variación del potencial e intensidad de la corriente [20]. En el campo de la lubricación, la voltamperometría lineal de barrido 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* [21].
- ASTM D6971: *Standard Test Method for Measurement of Hindered Phenolic and Aromatic Amine Antioxidant Content in Non-Zinc Turbine Oils by Linear Sweep Voltammetry* [22].
- ASTM D6810: *Standard Test Method for Measurement of Hindered Phenolic Antioxidant Content in Non-Zinc Turbine Oils by Linear Sweep Voltammetry* [23].

A través de esta técnica analítica se puede determinar la concentración de antioxidantes presentes en el aceite lubricante aplicándole un potencial de 0,0 V a 1,7 V a una velocidad de 0,1 V/s. La facilidad de desprendimiento de un electrón, también conocido como potencial de oxidación, define el proceso de oxidación de los antioxidantes nombrados previamente. El equipo empleado en este trabajo para la medición de los aditivos remanentes es el RULER (*Remaining Useful Life Evaluation Routine*) Antioxidant Monitoring de Fluitec, el cual se trata de un equipo portátil de fácil manejo y versatilidad con el que se puede determinar de una manera rápida y precisa el estado del lubricante.



Figura 8: RULER Antioxidant Monitoring de Fluitec

Tras realizar el ensayo, se representa el RUL Number (también conocido como Índice RUL) frente al tiempo de barrido del voltaje a través de un voltamperograma. El RUL Number, el cual es directamente proporcional a la concentración de antioxidantes remanente en el aceite, es un valor de intensidad a un potencial dado. Una vez conocida la concentración de antioxidantes se puede determinar el porcentaje de vida útil remanente del aceite. Debido a que cada especie de aditivos tiene un potencial de oxidación diferente, se puede determinar el tipo de aditivo en función del tiempo. Aquellos aditivos con un potencial de oxidación menor, se oxidarán antes y como resultado aparecerán antes en el voltamperograma.

El estudio de los aceites lubricantes de motor se realiza con una disolución azul en la cual, posteriormente en el voltamperograma, los aditivos ZDDP (dialquilditiofosfato de zinc) aparecen entre 6 y 10 segundos después de comenzar el ensayo, los aditivos amínicos entre 9 y 12 segundos y los aditivos fenólicos entre 13 y 17 segundos.

Generalmente, los aditivos ZDDP compuestos de metales de fósforo y zinc entre otros componentes, se consumen con una mayor rapidez que los aditivos amínicos y fenólicos. Por ello, es de especial interés estudiar la tendencia y el comportamiento de los aditivos ZDDP porque están íntimamente ligados con los niveles de oxidación y acidificación. Si estos aditivos se agotan, la vida del aceite se reduce drásticamente al aumentar los niveles de oxidación y acidificación.

La línea voltamperométrica puede verse desplazada frente a la línea de referencia por la formación de compuestos oxidativos en muestras que la degradación sea excesiva. De esta manera, se estima que el valor de RUL Number o vida útil remanente no debe ser nunca inferior al 25% porque se verían comprometidos parámetros relacionados con la oxidación y la acidificación, siendo ambos muy perjudiciales tanto para la degradación del aceite lubricante como para el desgaste del motor.

4.4. Espectrometría infrarroja

La espectrometría infrarroja es un método de análisis capaz de determinar cualitativamente, y en gran parte cuantificar, los compuestos presentes en una muestra [24]. A través del estudio de absorción de radiación infrarroja a diferentes longitudes de onda se puede realizar dicha determinación.

Mediante una comparativa entre una muestra de aceite usado frente a una muestra de ese mismo aceite nuevo, esta técnica proporciona información importante. Es frecuente encontrar fenómenos de interferencias y enmascaramientos de señales, por ello se recomienda realizar una determinación cuantitativa más minuciosa y con un mayor rigor. Además, con el uso de una técnica analítica adicional, se puede corroborar el resultado obtenido en primer lugar.

Dentro del espectro electromagnético, la región infrarroja se encuentra entre $3 \cdot 10^{12}$ y $3 \cdot 10^{14}$ Hz de frecuencia. Este intervalo expresado en longitud de onda se comprende entre $100 \mu\text{m}$ y $1 \mu\text{m}$ de longitud de onda. La inversa de la longitud de onda se conoce como número de ondas (en cm^{-1}) y, generalmente, se suele expresar esta región de esta manera.

A su vez, la región infrarroja comprendida entre 14290 y 200 cm^{-1} se divide en tres regiones bien diferenciadas: región cercana (NIR) entre 14290 y 4000 cm^{-1} , región media (mid-IR) entre 4000 y 400 cm^{-1} y región lejana (FIR) entre 400 y 200 cm^{-1} . En la región cercana aparecen los armónicos de las frecuencias naturales de las moléculas, mientras que en la región lejana se aprecian las vibraciones propias de las moléculas. Por ambos motivos, la región que resulta de mayor interés para la identificación de compuestos orgánicos es la región media.

Se define un espectro infrarrojo como un conjunto de frecuencias en las que se producen las absorbancias infrarrojas de los compuestos orgánicos. El espectro se representa enfrentando valores de intensidad como absorbancia (A) o porcentaje de transmitancia (T) frente a la posición medida en longitud de onda o número de ondas.

Se considera la absorbancia como la cantidad de intensidad de luz infrarroja capaz de absorber la muestra [25]. De esta manera, un cuerpo translucido que absorbe cierta cantidad de luz de un haz incidente, transmite la luz restante. Por lo tanto, cuanto mayor sea la luz absorbida o la absorbancia, menor será la luz transmitida o la transmitancia.

Debido a que la absorbancia está relacionada con la concentración de la muestra (C) de una manera lineal, es preferible su utilización para un análisis cuantitativo y, generalmente, se utiliza la transmitancia con mayor frecuencia. 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 (6).

$$T = \log \frac{E}{E_0} \quad (6)$$

Donde:

T , es la transmitancia.

E , es la energía radiante transmitida por la muestra.

E_0 , es la energía radiante incidente sobre la muestra.

El estudio de la espectrometría infrarroja presenta cuatro premisas que se nombran a continuación:

- Las sustancias orgánicas poseen unas frecuencias de absorción propias y características.
- Cada sustancia tiene un espectro único y específico de dicha sustancia.
- El espectro de una mezcla de sustancias es la suma de los espectros de cada sustancia por separado.
- La concentración en la muestra influye en la intensidad de una banda de absorción.

A pesar de contar con un amplio abanico de posibilidades para la medición del espectro infrarrojo, para la realización de este trabajo se ha utilizado un Espectrómetro Infrarrojo por Transformada de Fourier (FT-IR) de A2 Technologies (actualmente perteneciente al grupo Agilent Technologies) de la serie 5500t (Figura 9), el cual se compone de un sistema óptico basado en el interferómetro de Michelson.



Figura 9: FT-IR de A2 Technologies de la serie 6600t

Para realizar la medición de la muestra, incide radiación sobre ella atravesando un espejo semirreflectante que divide el haz de luz en dos partes iguales. Ambos haces de luz se reflejan sobre un espejo fijo y otro móvil siendo interferidos en su viaje de vuelta y, mediante del detector, analizando dicha interferencia. Una vez analizada la interferencia producida se procede a representar la información en un interferograma, el cual grafica la intensidad frente al desfase. Para desarrollar en serie el interferograma se hace uso del método matemático de la transformada de Fourier.

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* [26].
- ASTM D7214: *Standard Test Method for Determination of the Oxidation of Used Lubricants by FT-IR Using Peak Area Increase Calculation* [27].
- 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* [28].
- 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* [29].
- ASTM D7415: *Standard Test Method for Condition Monitoring of Sulfate By-Products in In-Service Petroleum and Hydrocarbon Based Lubricants by Trend Analysis Using Fourier Transform Infrared (FT-IR) Spectrometry* [30].
- ASTM D7624: *Standard Test Method for Condition Monitoring of Nitration in In-Service Petroleum and Hydrocarbon-Based Lubricants by Trend Analysis Using Fourier Transform Infrared (FT-IR) Spectrometry* [31].
- ASTM D7844: *Standard Test Method for Condition Monitoring of Soot in In-Service Lubricants by Trend Analysis using Fourier Transform Infrared (FT-IR) Spectrometry* [32].

La principal diferencia entre los estándares citados con anterioridad es la forma de cuantificar la presencia de los compuestos. La forma del pico se puede determinar mediante su altura o su área e interpolándolo con una línea base de referencia para realizar un análisis cuantitativo. El equipo utilizado en el desarrollo de este trabajo emplea una línea base doble en las cuales dos puntos del espectro marcan la base del mismo.

En el espectro del aceite usado, aparecen nuevos picos procedentes de la degradación y contaminación del aceite usado que no aparecen en el espectro del aceite nuevo. Dichos picos son debidos fundamentalmente a la oxidación, presencia de glicoles del refrigerante o presencia de agua entre otras causas.

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 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 cm^{-1} debido a la vibración del enlace -OH.

4.5. Espectrometría ICP-OES

La espectrometría está basada en la interacción entre la radiación electromagnética y la materia cuando se produce un intercambio de energía. Al excitar a los átomos, estos producen espectros electromagnéticos característicos que pueden ser identificados, haciendo posible diferenciar a los elementos químicos. Dichos elementos generan máximos de energía a una longitud de onda e intensidad en un espectro de emisión [33].

Para realizar la medición de la espectrometría existen diferentes técnicas, pero en el desarrollo de este trabajo se ha utilizado el espectrómetro de emisión atómica, 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)* [34].

El equipo comercial utilizado es el ICP-OES de Thermo Scientific, modelo iCAP 7400 con configuración radial (Figura 10), con un sistema automuestreador Autosampler CETAC ASX-520+.



Figura 10: ICP-OES de Thermo Scientific, modelo iCAP 7400 con configuración radial

Está compuesto principalmente por los siguientes elementos [35]:

- 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: Con el fin de que la muestra no entre en contacto con otros elementos y sea contaminada se utiliza una bomba peristáltica que impulsa la muestra a través de un tubo mediante unos rodillos.
- 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 11): 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 11: 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.

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. Tras ello, pasa a la antorcha donde se excita y los átomos emiten su radiación característica. Dicha radiación se clasifica en longitudes de onda y es transformada posteriormente en valores de concentración. En la Tabla 12 se observan el límite de detección y los rangos mínimos y máximos de los diferentes elementos a sus respectivas longitudes de onda.

Elemento	Longitud de onda (nm)	Rango mínimo (ppm)	Rango máximo (ppm)	Límite de detección (ppm)	Aditivo	Desgaste
Ag	328,070	0,5	50	0,6		X
Al	308,220	6	40	1		X
B	208,959	4	30	1	X	
Ba	233,530	0,5	4	0,03	X	
Ca	184,006	40	9000	0,05	X	
Cr	205,550	1	40	0,2		
Cu	327,396	2	160	0,4		X
Fe	259,940	2	140	0,1		X
Mg	279,079	5	1700	0,04	X	
Mn	257,610	5	700	0,1		X
Mo	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 12: Longitud de onda (nm), rango (ppm) y límite de detección (ppm) para ICP-OES

5. PRUEBA DE CAMPO DE LUBRICANTES EN MCIA

5.1. Definición de la prueba

Para poder definir una prueba de estas características de una manera adecuada es clave establecer unos criterios que se deben garantizar a lo largo de la prueba para que esta sea exitosa. Estos criterios se pueden agrupar en cinco grandes bloques detallados a continuación.

En primer lugar, se debe realizar una comparación en el comportamiento entre los nuevos aceites propuestos para el estudio y los aceites previos que ya están en funcionamiento en la flota.

En segundo lugar, al utilizarse diferentes modelos de autobús y diferentes tecnologías se amplía la variedad de vehículos y se garantiza que los resultados son generales y no específicos de un modelo o tecnología en concreto.

En tercer lugar, el volumen de muestras recogidas es significativamente alto como para que los resultados obtenidos sean representativos de toda la población a nivel estadístico. El gran volumen de muestras significativas se asocia, además, a cada uno de los aceites evaluados y de los motores estudiados.

En cuarto lugar, se debe garantizar una precisión en las medidas. Para ello, es necesario establecer un periodo de muestreo medido en kilometraje acorde al periodo de cambio de aceite. De esta manera, se observa la tendencia y se puede establecer con mayor exactitud los momentos de cambio de tendencia de los diferentes parámetros.

En quinto lugar, los modelos de autobús deben ser elegidos en función del kilometraje y trayecto diarios para obtener una mínima variabilidad y conseguir una similitud en el funcionamiento.

La flota de autobuses con la que se ha realizado la prueba se compone de cuatro modelos de vehículos diferentes, cuyas especificaciones técnicas se pueden observar en la Tabla 13. Se ha seleccionado un total de 49 vehículos para realizar el estudio, de los cuales 10 tienen un motor diésel con tecnología de emisiones Euro V, 10 tienen un motor diésel con tecnología de emisiones EEV, 9 con motor diésel y tecnología de emisiones Euro IV y 19 con motor de gas natural comprimido (GNC) y tecnología de emisiones EEV. Como se puede observar en los modelos de autobús, se ha realizado la prueba con un gran número de vehículos de diferentes motores y tecnologías de emisiones.

Además, la flota de autobuses estudiada presenta una serie de ventajas muy significativas como la similitud de los trayectos diarios realizados por los autobuses o la repetitividad en el ciclo de funcionamiento del motor.

Por otra parte, la variabilidad en condiciones ambientales, condiciones de ruta, condiciones de manejo y variables específicas del servicio son fácilmente cuantificables, pero difícilmente evaluables en el objetivo de la prueba a realizar.

	Diésel Euro V	Diésel EEV	Diésel Euro IV	GNC EEV
Año	2010	2010	2008	2007
Longitud [m]	11,95	12	17,94	12
Ancho [m]	2,55	2,55	2,55	2,5
Altura [m]	3	3,15	3	3,3
Cilindrada [cc]	7200	9300	11967	11967
Nº de cilindros	6	5	6	6
Potencia [kW]	210@2200 rpm	170@1900 rpm	220@2200 rpm	180@2200 rpm
Torque [Nm]	1250@1100 rpm	1050@1500 rpm	1250@1100 rpm	880@1000 rpm
Volumen del cárter [l]	29	31	31	33
Turbocompresor	Turbo +	Turbo +	Turbo +	Turbo +
EGR	Intercooler No	Intercooler Si	Intercooler No	Intercooler -

Tabla 13: Especificaciones técnicas de los modelos de autobús

Para realizar la prueba en los vehículos previamente descritos se han estudiado tres aceites diferentes cuyas características técnicas se observan en la Tabla 14. De estas tres nuevas formulaciones, el aceite A es el genérico de toda la flota y lo usan vehículos que no están incluidos en la prueba, mientras que el aceite B y el aceite C son nuevas formulaciones desarrolladas exclusivamente para el estudio de su comportamiento en una flota de vehículos. Como se ha comentado anteriormente, el estudio consiste en la evaluación de los parámetros de degradación, contaminación y desgaste de las nuevas formulaciones y su comparación con la formulación usada en toda la flota.

Cabe destacar que el aceite C empleado se trata de un aceite no comercial, puesto que no cumple con las exigencias de ACEA para esta tipología de motores al tener un valor de viscosidad HTHS inferior a 3,5 cP.

	Unidades	Aceite A	Aceite B	Aceite C
Grado SAE	-	5W30	5W30	5W30
API	-	CJ-4	CK-4	FA-4
Viscosidad HTHS	cP	3,5	3,5	3,0
KV @ 40°C	cSt	69,34	68,22	54,97
KV @ 100°C	cSt	12,35	12,61	10,47
TAN	mg KOH/g	0,39	0,57	0,92
TBN	mg KOH/g	10,43	11,26	11,79
Oxidación	Abs. cm ⁻¹ /0.1mm	12,95	13,67	13,93
Nitración	Abs. cm ⁻¹ /0.1mm	6,65	6,25	6,41
Aditivos amínicos	Abs. cm ⁻¹ /0.1mm	6,90	9,71	9,88
Aditivos antidesgaste	Abs. cm ⁻¹ /0.1mm	6,74	5,13	5,44

Tabla 14: Características técnicas de los aceites

A través de la Tabla 15 se muestra la relación entre los modelos de autobús y el aceite lubricante utilizado en cada uno de ellos. Además, se observa la cantidad de vehículos que utilizan cada uno de los aceites lubricantes, siendo un total de 5 vehículos con el aceite A, 24 vehículos con el aceite B y 19 vehículos con el aceite C. Cabe destacar que el aceite A, al ser genérico de toda la flota, solo se utiliza en un modelo de autobús de la prueba.

Aceites utilizados		
Diésel Euro V	Aceite A (5)	Aceite B (5)
Diésel EEV	Aceite B (6)	Aceite C (4)
Diésel Euro IV	Aceite B (4)	Aceite C (5)
GNC EEV	Aceite B (9)	Aceite C (10)

Tabla 15: Relación entre los modelos de autobús y el aceite utilizado

Tras definir los modelos de autobús incluidos en la prueba, las formulaciones de aceite lubricantes estudiadas y la relación entre ellos, se debe definir los periodos de toma de muestra para analizar tendencias. En el caso de esta flota de autobuses, el periodo de muestreo se ha definido en función del periodo de cambio de aceite y del kilometraje asociado para realizar tareas de mantenimiento. Dado que el periodo de cambio de aceite es de 30.000 kilómetros, se realizan tomas de muestra de cada 5.000 kilómetros para, de esta manera, tener un total de 6 muestras de cada vehículo espaciadas equitativamente en términos de kilometraje.

5.2. Procedimiento de muestreo

El procedimiento de muestreo es un proceso crítico dentro del mantenimiento según el estado del aceite porque se debe garantizar que el aceite a analizar es una muestra representativa del total de aceite que circula por el sistema [36]. Para ello, se detalla un procedimiento que se debe seguir y mediante el cual se garantiza que la muestra es representativa, pero se deben tener las siguientes consideraciones previas:

- En el punto de muestreo, el aceite debe encontrarse en movimiento, evitando así ciertos puntos del circuito donde el aceite fluye en menor cantidad como puntos de remanso.
- Se debe muestrear en las condiciones de funcionamiento de los motores, evitando de esta manera muestrear cuando la máquina esta parada o recién arrancada.
- Evitar tomar muestras de puntos que se encuentran posterior al filtro de aceite, debido a que la muestra estaría recién filtrada y no sería representativa del conjunto del circuito.
- Almacenar el fluido extraído en recipientes adecuados para ello, estando estos recipientes nuevos y limpios para evitar contaminar el fluido que se acaba de extraer.
- Cerrar el recipiente adecuadamente para evitar la modificación de la composición y la contaminación de las muestras.
- Realizar los ensayos pertinentes en un periodo de tiempo relativamente breve para que la muestra siga manteniéndose homogénea sin que precipite la materia insoluble con el tiempo.

Conociendo todas las consideraciones previas comentadas, se dispone de diferentes técnicas y metodologías de muestreo. Concretamente, en este trabajo se ha utilizado la técnica de la bomba de vacío que se explica a continuación paso por paso:

1. Primeramente, se debe arrancar el vehículo para poner en funcionamiento el motor y las bombas de lubricante. Tras ello, dejarlo al ralentí de 5 a 10 minutos para que la muestra sea homogénea dentro de todo el circuito.
2. A continuación, en la parte donde se encuentra el motor, se extrae la varilla de medición del aceite en el cárter.
3. Seguidamente, se introduce un tubo de poliuretano nuevo y limpio por el tubo de la varilla del aceite (Figura 12). El extremo del tubo que se introduce debe estar sumergido completamente en el aceite del cárter, mientras que en el otro extremo debe colocarse la bomba de vacío.



Figura 12: Introducción del tubo de poliuretano en el cárter

4. Una vez unida la bomba de vacío con el tubo de poliuretano, se conecta la bomba con un recipiente de almacenaje nuevo para el aceite que se extrae del cárter.
5. Manteniendo una posición vertical del recipiente, se acciona la bomba para que comience el proceso de extracción del aceite (Figura 13). Se llena generalmente un 80% del volumen que puede contener el recipiente para que se pueda realizar una homogenización previa al realizar los ensayos.
6. Por último, se retira el tubo de poliuretano, el cual se deshecha posteriormente y se introduce la varilla de medición del nivel para completar el proceso.



Figura 13: Proceso de extracción del aceite

Si se proporciona gran cantidad de datos en el momento del muestreo, se puede realizar un análisis posterior que garantice unos resultados más precisos sobre la muestra tomada. En el desarrollo de este trabajo y en el procedimiento de muestreo, se ha hecho uso de etiquetas personalizadas que se muestran en la Figura 14 donde se recopila la siguiente información:

- ID Sample: Es un número codificado de tres dígitos que identifica rápidamente a la muestra y a través del cual se puede acceder al resto de la información sobre esa misma muestra.
- Motor: Este campo indica la tipología de motor utilizada en el vehículo. Se debe rellenar con una "D" para motores diésel, seguido de EIV para los motores Euro IV, EV para los motores Euro V y EEV para los motores EEV, o con una "G" para motores de tecnología GNC.
- Aceite: A través de este campo se identifica el aceite que circula por el sistema de lubricación. Como únicamente se ha realizado la prueba con tres aceites, se rellena este campo con la letra "A" para el Aceite A, la letra "B" para el aceite B y la letra "C" para el aceite C.
- Km Aceite: Mediante este campo se identifica durante cuanto kilometraje se ha hecho uso del aceite empleado. Debido a que el procedimiento de muestreo se realiza cada 5.000 kilómetros, es vital conocer este campo para identificar correctamente en que punto de la prueba se encuentra el aceite.
- Km Bus: El último campo sobre el que se toman datos es el kilometraje total que ha realizado el vehículo. Se debe tener en consideración este dato en el momento de realizar el análisis para extraer conclusiones en función de la longevidad del motor.

ID Sample										
Motor	D		G		Aceite	A		B		C
Km Aceite					Km Bus					

Figura 14: Etiqueta identificadora de muestra

ID Sample	140									
Motor	D		G	X	Aceite	A		B	X	C
Km Aceite	16487.45				Km Bus	437845.161				

Figura 15: Ejemplo etiqueta completa

5.3. Protocolo de análisis

Para realizar el estudio de los aceites lubricantes se ha hecho uso de las técnicas analíticas mencionadas anteriormente. El empleo de estas técnicas debe seguir un orden según la complejidad de la medición y la precisión deseada, puesto que los equipos que ofrecen una mayor precisión son los que se asocian con un mayor gasto económico en cada medida. El orden seguido en el desarrollo de este trabajo se explica a continuación, así como el detalle de cada una de las técnicas analíticas empleadas.

En primer lugar, se debe realizar la medición de la viscosidad. Para ello, se han empleado viscosímetros capilares, los cuales se clasifican en series con diferentes diámetros de capilar y, son utilizados en función de la viscosidad esperada. Debido al gran volumen de muestras analizadas, este tipo de viscosímetros presentan ventajas tales como el poco volumen de fluido de muestra que se necesita para obtener un valor correcto en la medición. Otro tipo de viscosímetros como el de bolas necesitan un volumen de muestra mucho mayor y los viscosímetros semiautomáticos se pueden obstruir con muestras muy contaminadas produciendo falsos errores y ofreciendo una baja fiabilidad en el estudio.

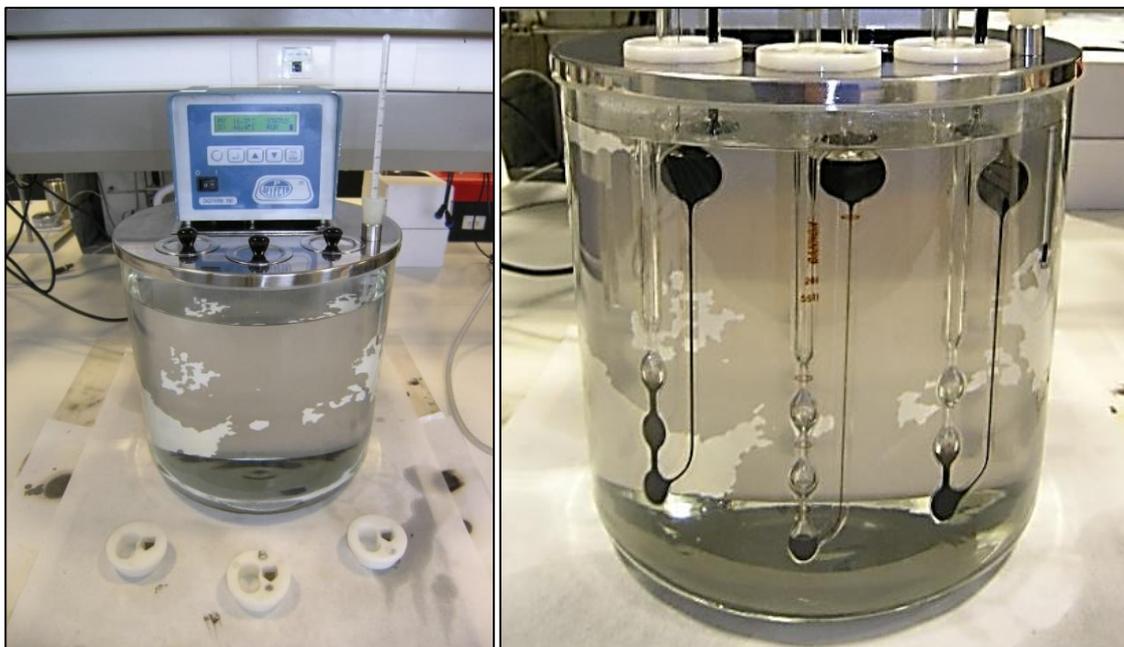


Figura 16: Viscosímetro capilar en montaje (izquierda) y en uso (derecha)

En segundo lugar, se emplea la espectrometría infrarroja para la medición de parámetros tales como la oxidación, la nitración o el nivel de aditivación, entre otros.

Con el uso de esta técnica se pueden utilizar dos metodologías diferentes para analizar los resultados en función del parámetro que se desee monitorizar. Cabe destacar que ambas metodologías estudian el parámetro basándose en la tendencia de los resultados y no en el valor absoluto y la precisión de la medida. Una de las metodologías consiste en estudiar el área encerrada entre dos líneas base, mientras que la otra metodología consiste en cuantificar la altura de pico. Si se analiza la tendencia y esta es positiva, se relaciona con la aparición de nuevos elementos en el aceite, en cambio, si la tendencia es negativa está relacionado con un consumo de las sustancias presentes.



Figura 17: Espectrómetro infrarrojo

En tercer lugar, se realiza la medición del RUL Number a través de la voltamperometría lineal de barrido. Esta técnica requiere de diferentes reactivos en función del aceite que se va a analizar, siendo en el caso de los aceites lubricantes de motor un reactivo llamado “azul”. Al igual que en otros equipos de medida, este equipo realiza la medición del área bajo la curva y, analizándola, extrae los resultados correspondientes.



Figura 18: Equipo RULER

En cuarto lugar, la valoración del nivel de acidificación y de basicidad se realiza mediante la técnica de termometría. Esta técnica presenta numerosas ventajas como la precisión y la reproducibilidad de las medidas frente a otras técnicas como la potenciometría o colorimetría.

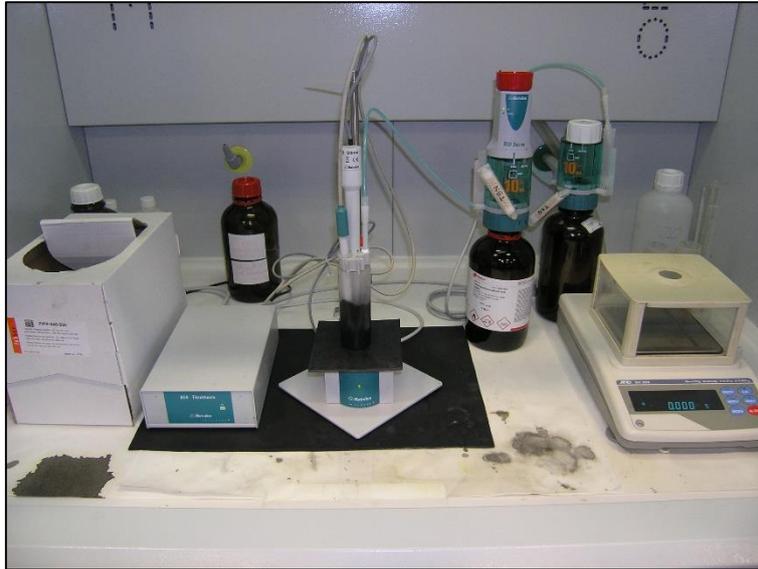


Figura 19: Termometría TAN/TBN

En quinto y último lugar, se ensaya la muestra en el equipo que proporciona una mayor cantidad de información debido a su complejidad. Para realizar una medición en el espectrómetro ICP-OES se preparan unas muestras de patrones (Blanco, S21 50 ppm, S21 300 ppm, AM 1000 ppm, AM 3000 ppm) que contienen una cantidad conocida de elementos metálicos en diferentes concentraciones. Los patrones, al igual que las muestras de aceite lubricante, se disuelven en los viales con keroseno a una proporción de 1:10, siendo una parte de aceite por diez partes de keroseno.



Figura 20: Espectrómetro ICP-OES

5.4. Resultados

Los resultados se presentan divididos en cuatro grandes bloques relacionados con el modelo de autobús estudiado. Cada aceite se asocia con un color determinado para su rápida identificación en cada una de las gráficas. El aceite A se representa con el color verde, el aceite B con el rojo y el aceite C con el azul. A su vez, cada vehículo posee una forma de símbolo determinada dentro de las gráficas, tal y como se puede observar en la leyenda, representándose siempre el aceite nuevo con un cuadrado.

5.4.1. Resultados Diésel Euro V

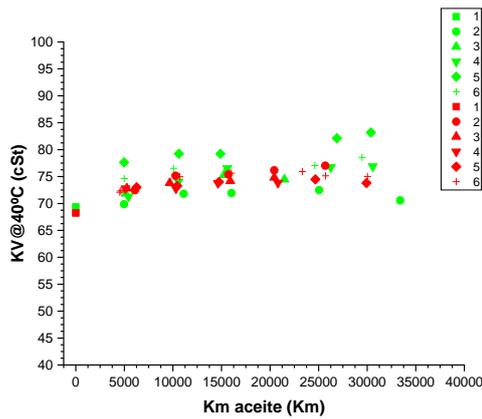


Figura 21: Diésel Euro V - KV a 40°C

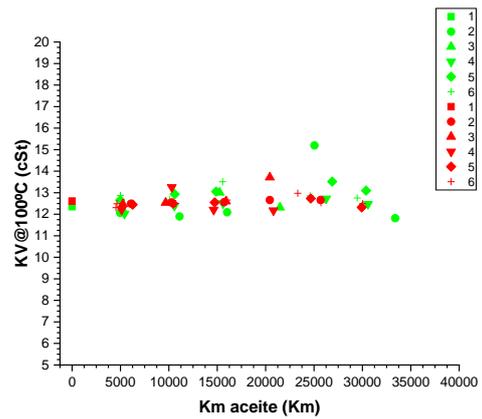


Figura 22: Diésel Euro V - KV a 100°C

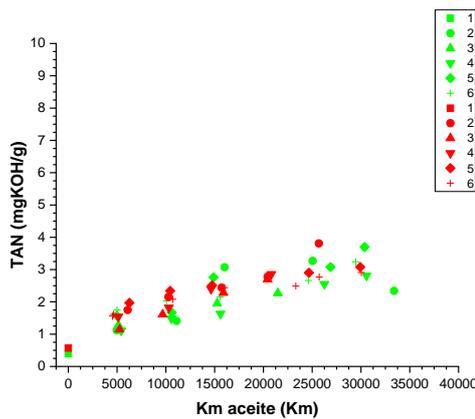


Figura 23: Diésel Euro V - TAN

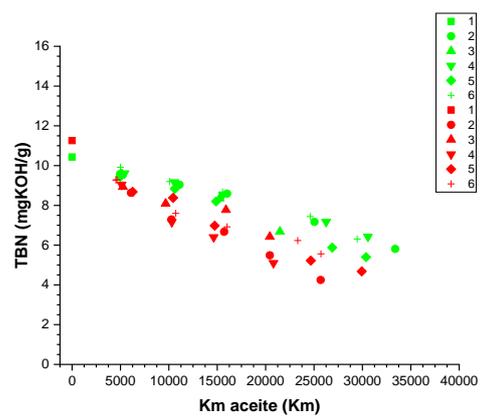


Figura 24: Diésel Euro V - TBN

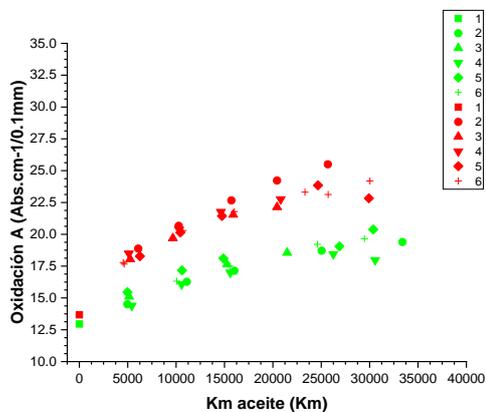


Figura 25: Diésel Euro V - Oxidación

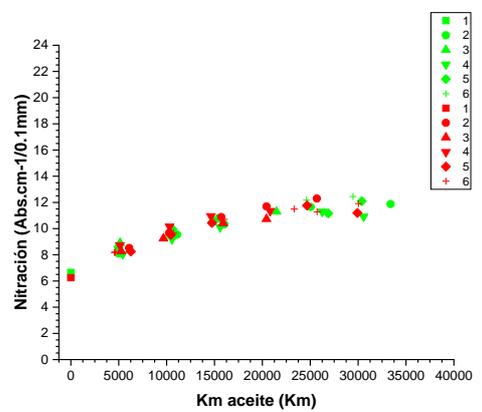


Figura 26: Diésel Euro V - Nitración

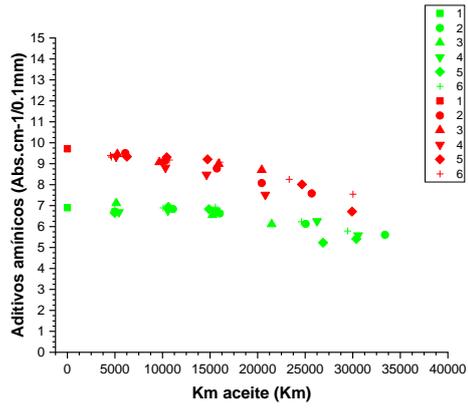


Figura 27: Diésel Euro V – Ad. amínicos

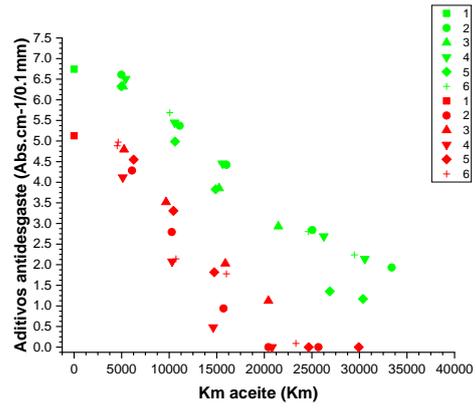


Figura 28: Diésel Euro V – Ad. antidesgaste

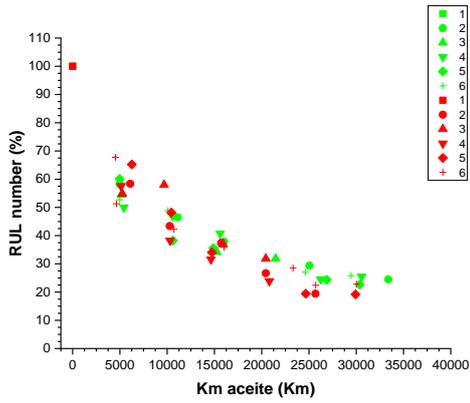


Figura 29: Diésel Euro V - RUL Number

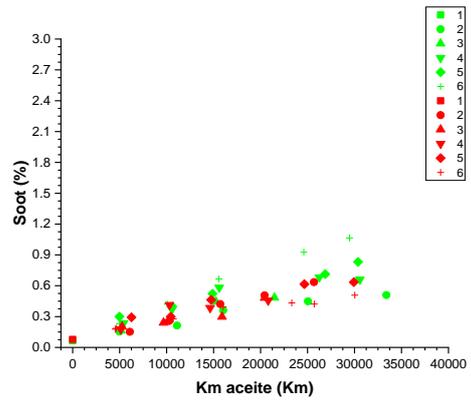


Figura 30: Diésel Euro V - Soot

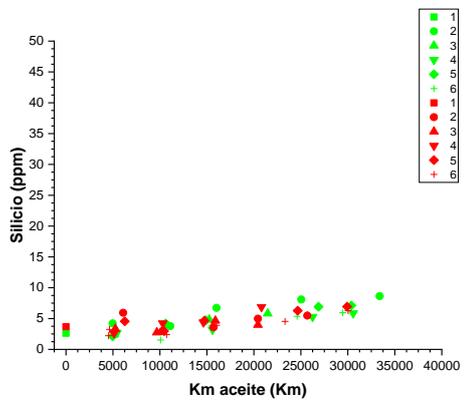


Figura 31: Diésel Euro V - Silicio

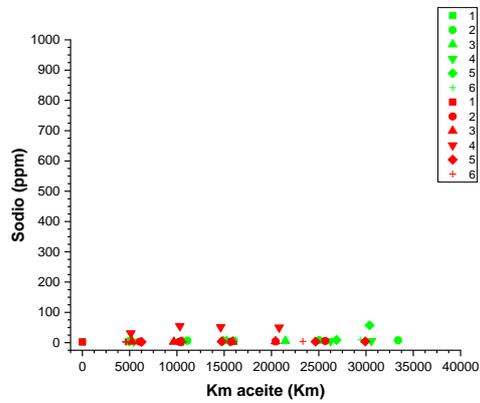


Figura 32: Diésel Euro V - Sodio

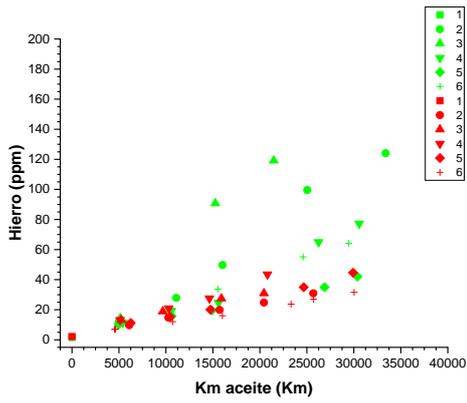


Figura 33: Diésel Euro V - Hierro

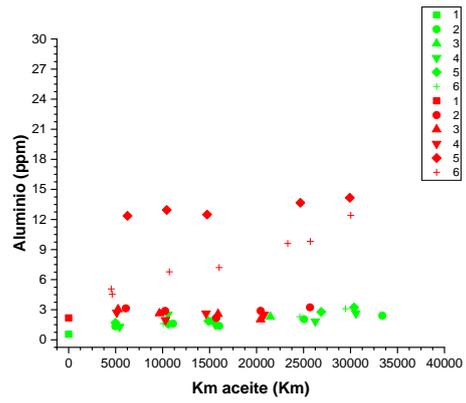


Figura 34: Diésel Euro V - Aluminio

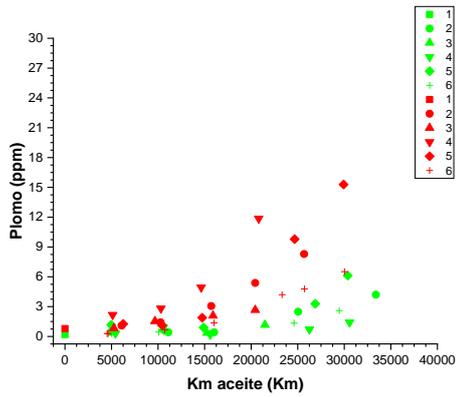


Figura 35: Diésel Euro V - Plomo

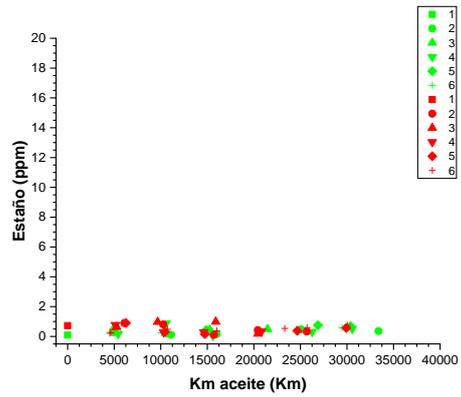


Figura 36: Diésel Euro V - Estaño

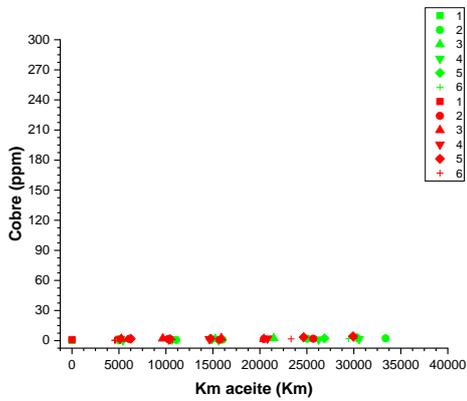


Figura 37: Diésel Euro V - Cobre

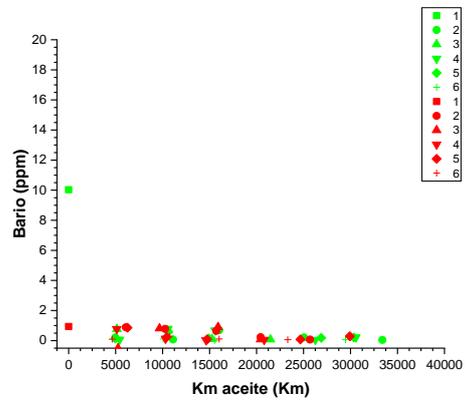


Figura 38: Diésel Euro V - Bario

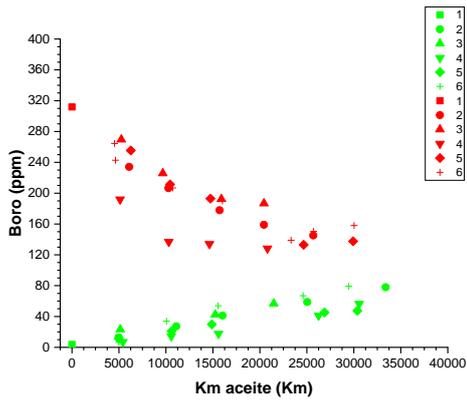


Figura 39: Diésel Euro V - Boro

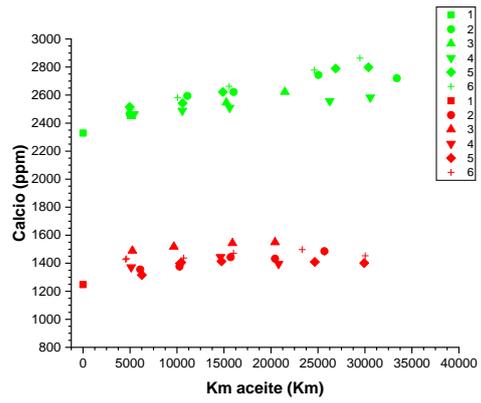


Figura 40: Diésel Euro V - Calcio

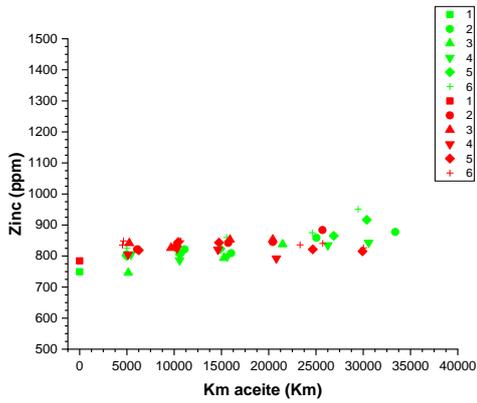


Figura 41: Diésel Euro V - Zinc

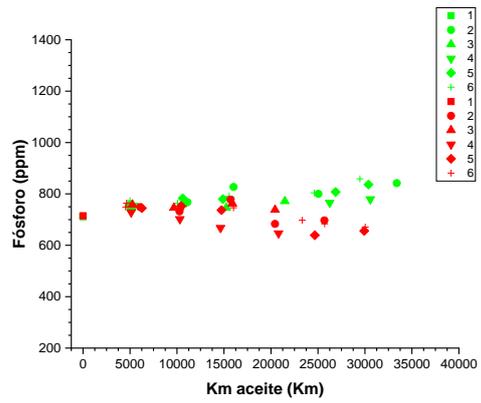


Figura 42: Diésel Euro V - Fósforo

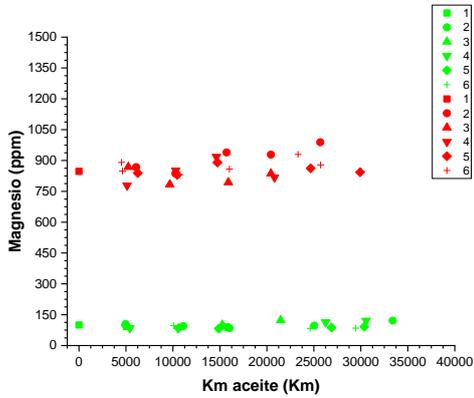


Figura 43: Diésel Euro V - Magnesio

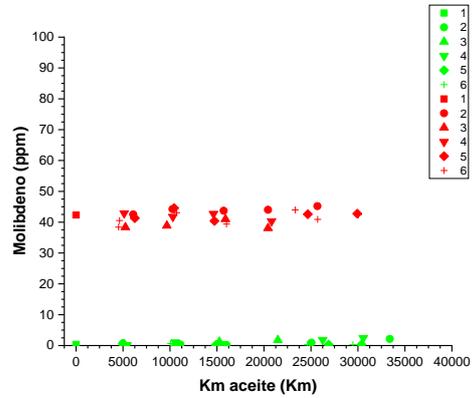


Figura 44: Diésel Euro V - Molibdeno

- Degradación

Atendiendo a la evolución de la viscosidad tanto a 40°C como a 100°C, ambos aceites presentan una tendencia similar con una mayor dispersión en los valores del aceite A que en los del aceite B.

El nivel de acidificación del aceite se encuentra en valores de 4 mg KOH/g en el momento del cambio, mientras que el nivel de la reserva básica disminuye por debajo del 50% del valor medido al inicio de la prueba, pero nunca por debajo del valor del nivel de acidificación medido (4 mg KOH/g).

El proceso de oxidación es ligeramente superior en el aceite B que en el aceite A cuya principal causa se puede deber a la pérdida más acelerada del paquete de aditivación antidesgaste. La nitración no se ve afectada por la pérdida de este paquete de aditivos y ambos aceites presentan comportamientos similares de tendencia.

El nivel de aditivación, tal y como se ha comentado con anterioridad, es claramente diferenciado entre el aceite A y el aceite B, siendo el aceite B el que pierde estos aditivos con mayor rapidez. En cuanto a los aditivos amínicos, la pérdida de estos no es tan acelerada y mantienen sus valores a lo largo de toda la prueba. Este comportamiento se puede apreciar desde el punto de vista del RUL Number donde se observa que ambos aceites tienen el paquete de aditivación agotado al final de la prueba, siendo el valor de éste inferior al 40% del valor inicial. Cabe destacar el comportamiento del boro en cuanto a los aditivos metálicos con un fuerte descenso.

- Contaminación

No se encuentra presencia de ningún agente contaminador, con unos valores relativamente bajos de presencia de sodio que no se pueden justificar como contaminación del líquido refrigerante.

- Desgaste

En cuanto al desgaste del motor, los valores determinados se encuentran dentro del rango típico para esta clase de vehículos. Únicamente se encuentran dos alteraciones en el contenido de plomo y aluminio debido probablemente al agotamiento rápido de los aditivos antidesgaste en el aceite B.

5.4.2. Resultados Diésel EEV

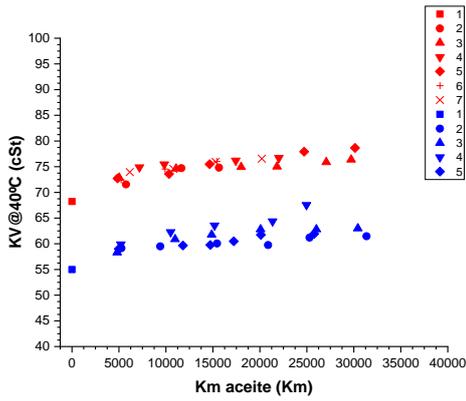


Figura 45: Diésel EEV - KV a 40°C

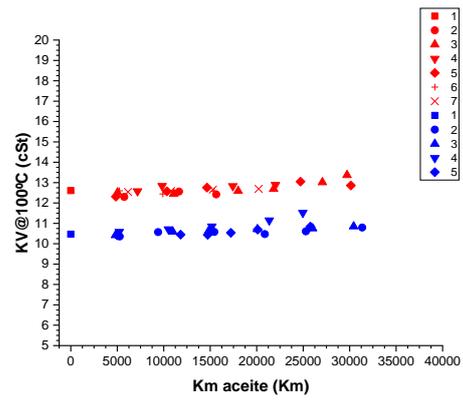


Figura 46: Diésel EEV - KV a 100°C

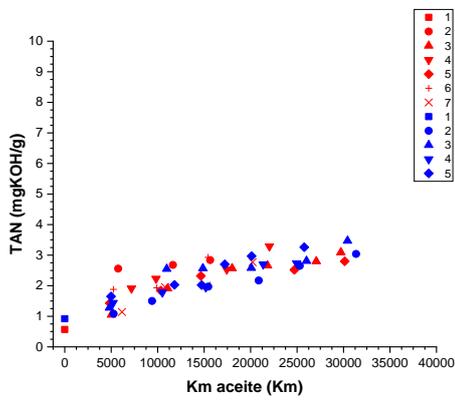


Figura 47: Diésel EEV - TAN

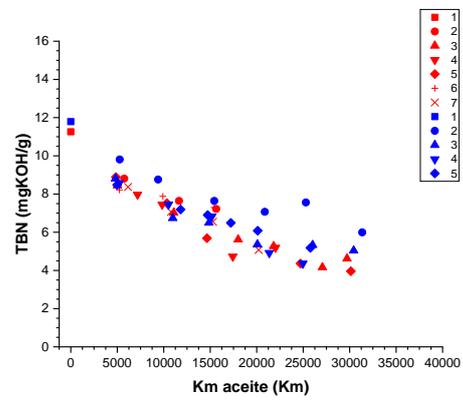


Figura 48: Diésel EEV - TBN

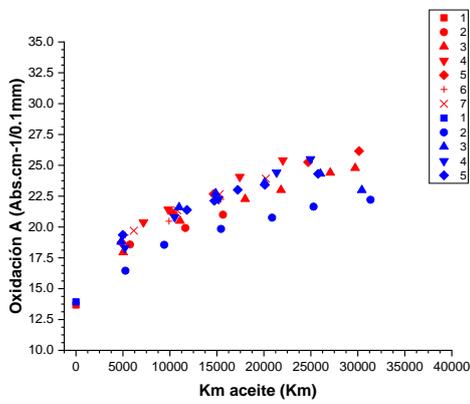


Figura 49: Diésel EEV - Oxidación

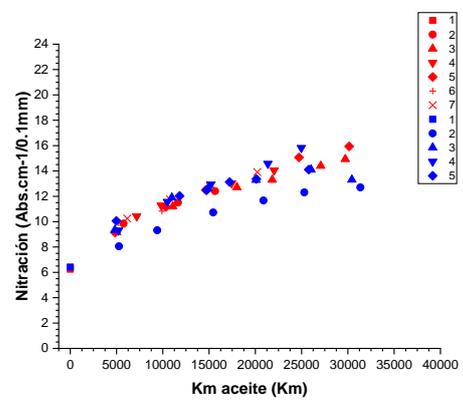


Figura 50: Diésel EEV - Nitración

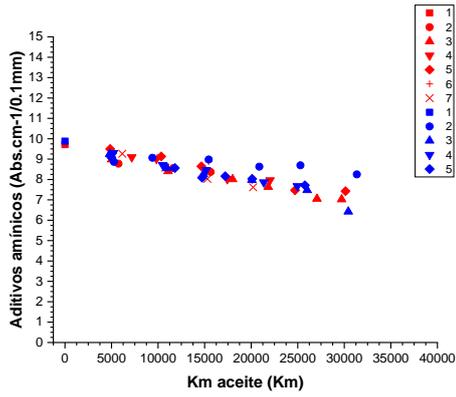


Figura 51: Diésel EEV - Ad. amínicos

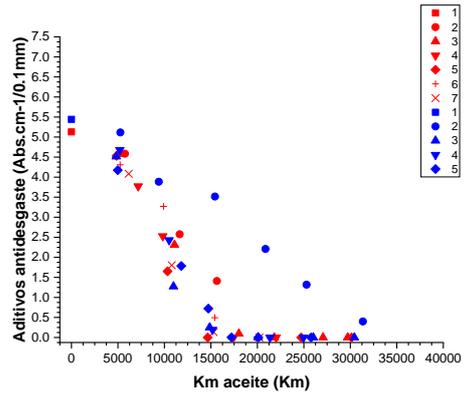


Figura 52: Diésel EEV - Ad. antioxidante

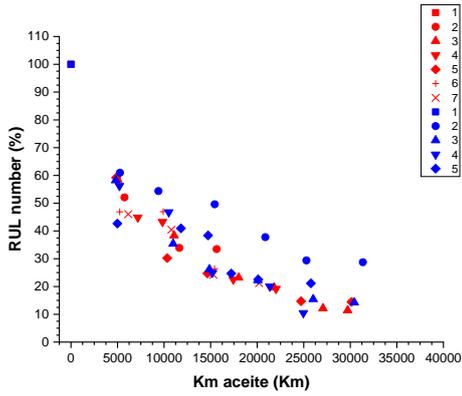


Figura 53: Diésel EEV - RUL Number

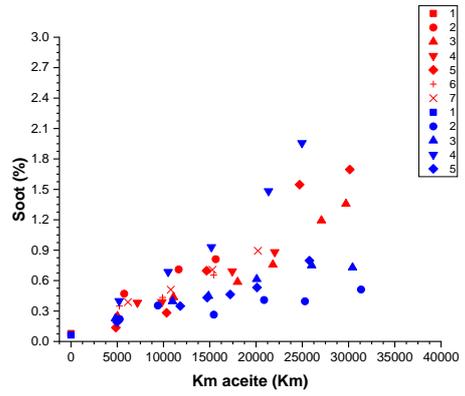


Figura 54: Diésel EEV - Soot

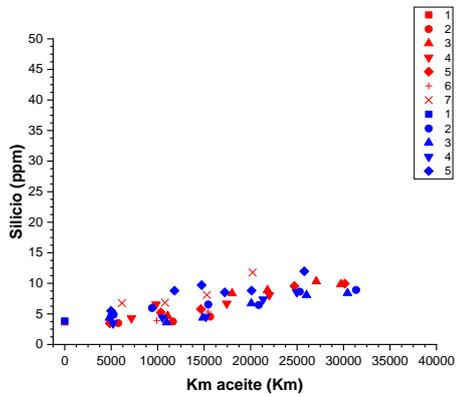


Figura 55: Diésel EEV - Silicio

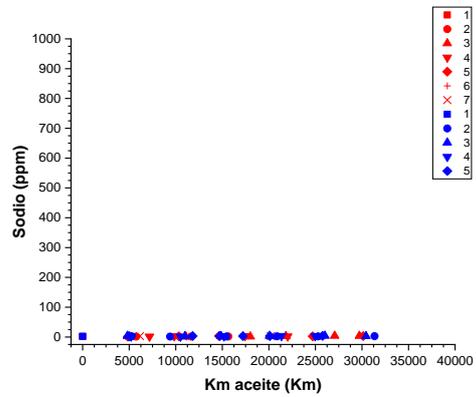


Figura 56: Diésel EEV - Sodio

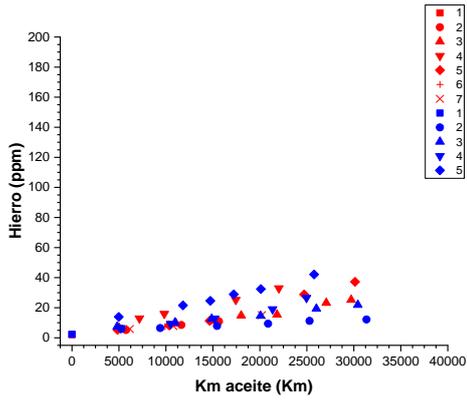


Figura 57: Diésel EEV - Hierro

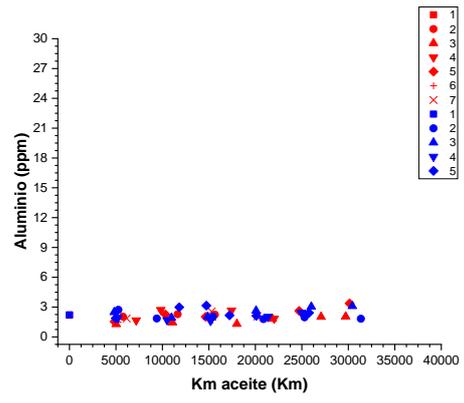


Figura 58: Diésel EEV - Aluminio

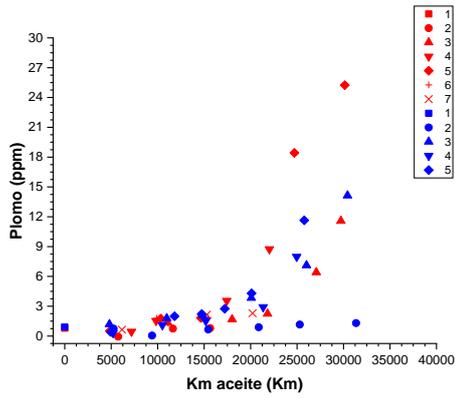


Figura 59: Diésel EEV - Plomo

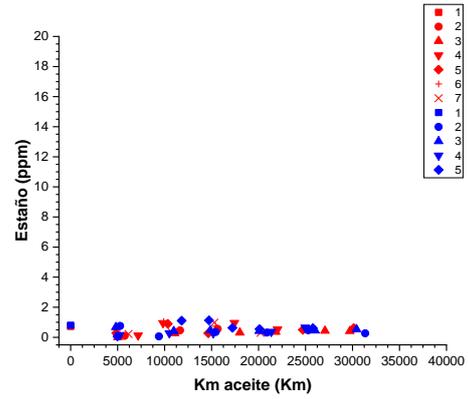


Figura 60: Diésel EEV - Estaño

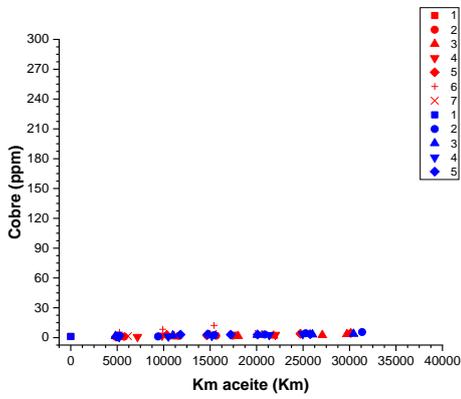


Figura 61: Diésel EEV - Cobre

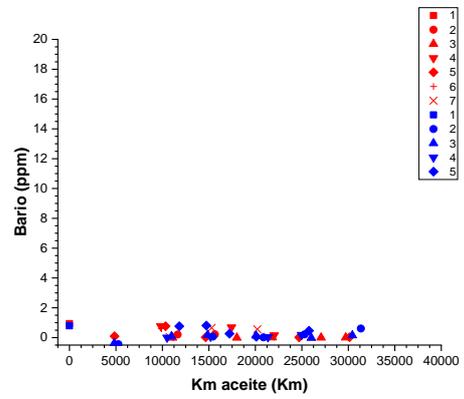


Figura 62: Diésel EEV - Bario

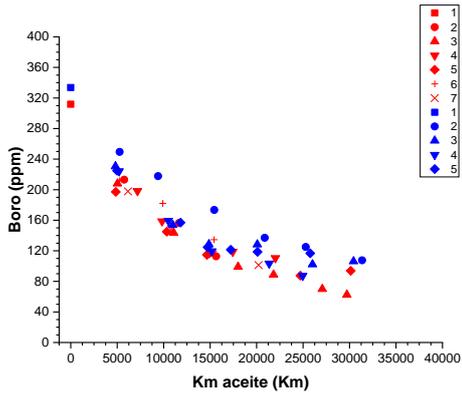


Figura 63: Diésel EEV - Boro

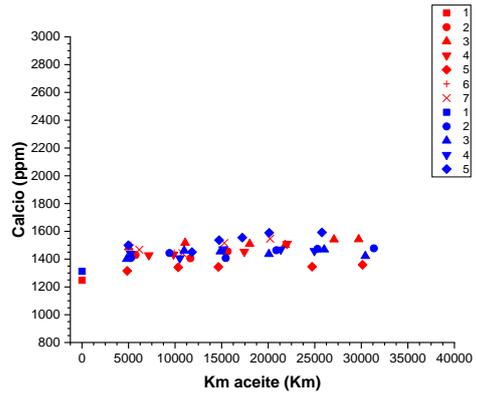


Figura 64: Diésel EEV - Calcio

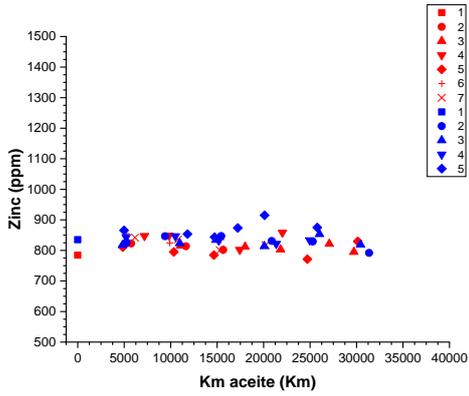


Figura 65: Diésel EEV - Zinc

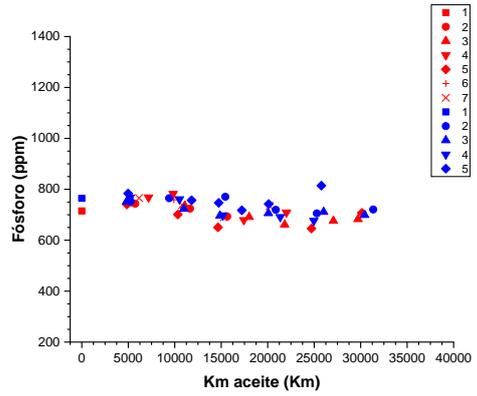


Figura 66: Diésel EEV - Fósforo

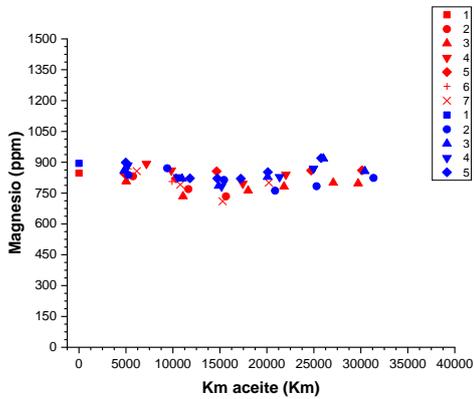


Figura 67: Diésel EEV - Magnesio

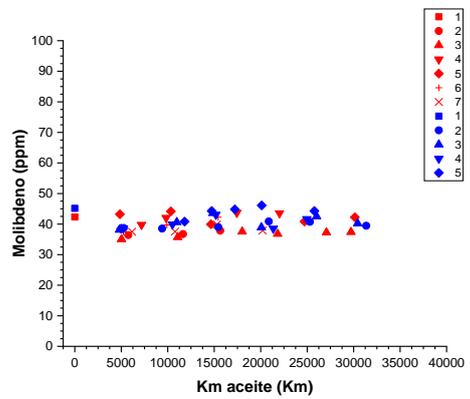


Figura 68: Diésel EEV - Molibdeno

- Degradación

Observado la evolución de la viscosidad, se puede determinar que ambos aceites se comportan de una manera similar. Mientras que en los valores de viscosidad a 40°C se aprecia un ligero incremento, en los valores de la viscosidad a 100°C hay una estabilidad a lo largo de toda la prueba.

El nivel de acidificación al finalizar la prueba se encuentra con unos valores ligeramente inferiores a 4 mg KOH/g. Por su parte, la reserva básica presenta una caída muy pronunciada, pero sin sobrepasar el valor de 4 mg KOH/g. Ambos aceites al finalizar la prueba se encuentran por debajo del 50% del valor inicial de reserva básica.

Tanto los valores de oxidación como nitración presentan una tendencia creciente con una alta similitud entre ambos aceites utilizados. Los valores concretos son superiores a los obtenidos en los otros motores diésel probablemente por el uso de la tecnología EGR.

El comportamiento de los aditivos también se puede derivar de la mayor exigencia producida por el uso de la tecnología EGR en el motor. Tanto es así que se observa una gran caída en el nivel de aditivos amínicos, mientras que el nivel de aditivos antidesgaste se agota a mitad de la prueba. Ambos fenómenos se aprecian claramente a través del RUL Number, donde el nivel de aditivación en el primer tercio de la prueba ya es inferior al 50% del valor medido inicialmente.

- Contaminación

No se encuentran síntomas apreciables de contaminación en ninguno de los parámetros estudiados.

- Desgaste

Al igual que en el caso de la contaminación, no se encuentran síntomas de metales de desgaste provenientes del motor a excepción de un aumento de plomo a mitad de la prueba, fenómeno que está en sintonía con el agotamiento de los aditivos antidesgaste.

5.4.3. Resultados Diésel Euro IV

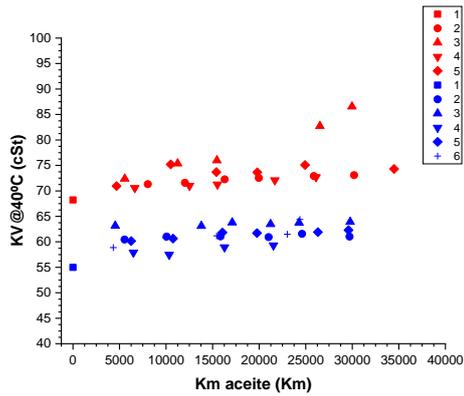


Figura 69: Diésel Euro IV - KV a 40°C

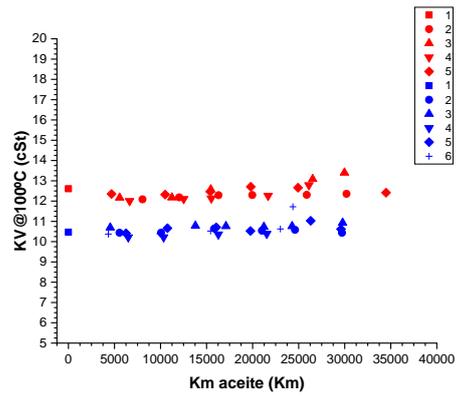


Figura 70: Diésel Euro IV - KV a 100°C

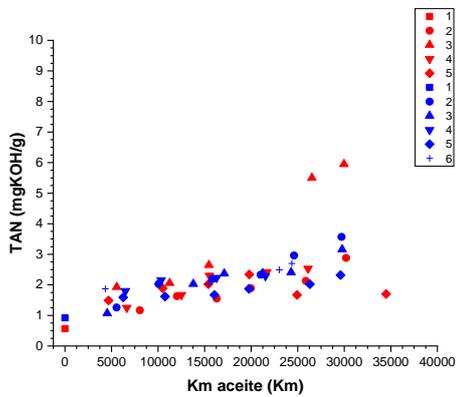


Figura 71: Diésel Euro IV - TAN

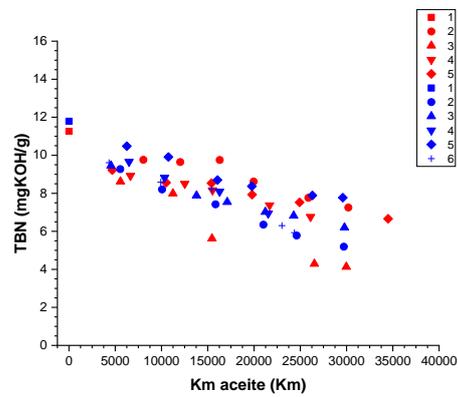


Figura 72: Diésel Euro IV - TBN

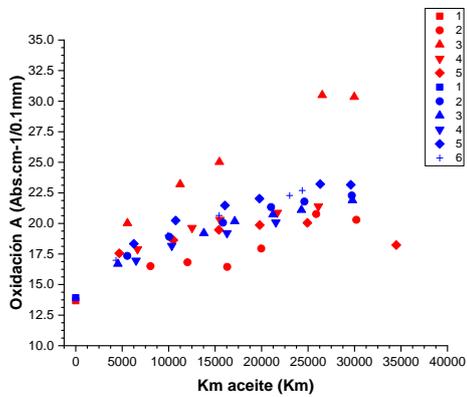


Figura 73: Diésel Euro IV - Oxidación

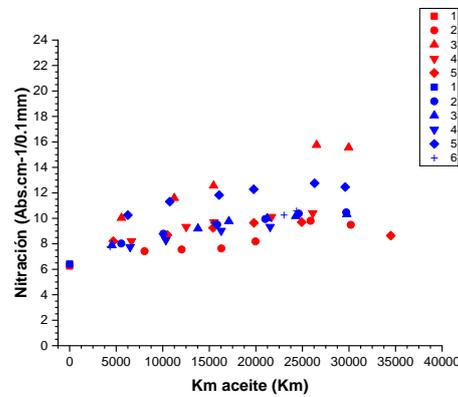


Figura 74: Diésel Euro IV - Nitración

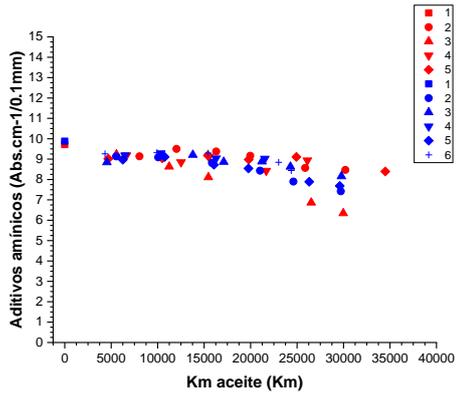


Figura 75: Diésel Euro IV - Ad. amínicos

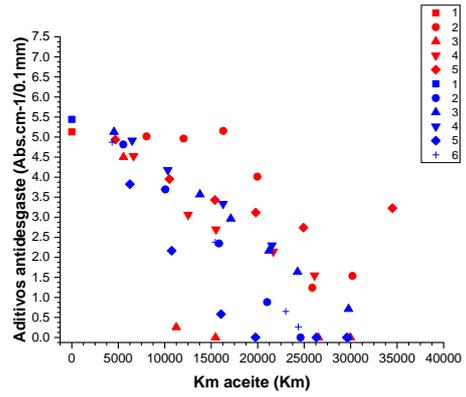


Figura 76: Diésel Euro IV - Ad. antidesgaste

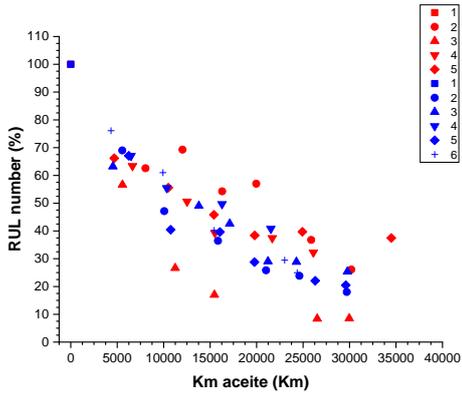


Figura 77: Diésel Euro IV - RUL Number

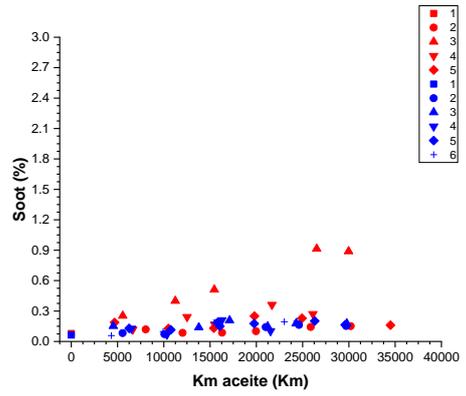


Figura 78: Diésel Euro IV - Soot

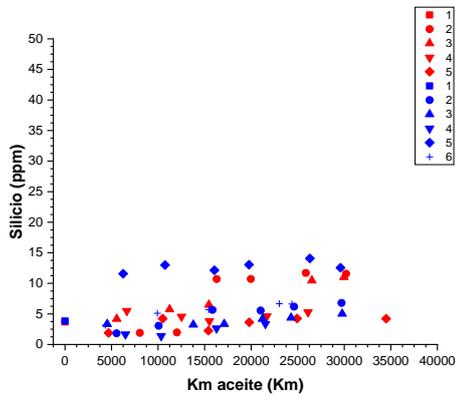


Figura 79: Diésel Euro IV - Silicio

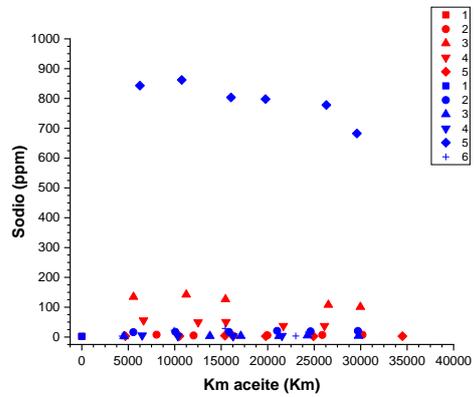


Figura 80: Diésel Euro IV - Sodio

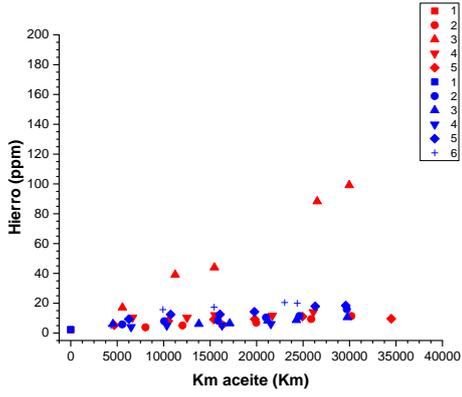


Figura 81: Diésel Euro IV - Hierro

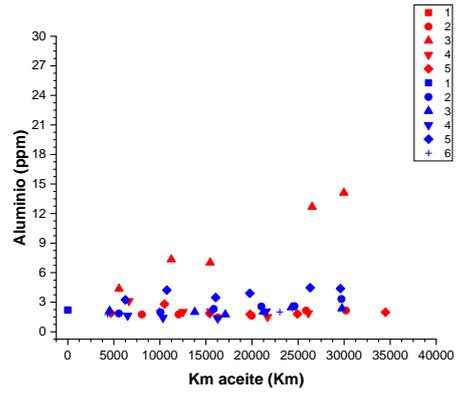


Figura 82: Diésel Euro IV - Aluminio

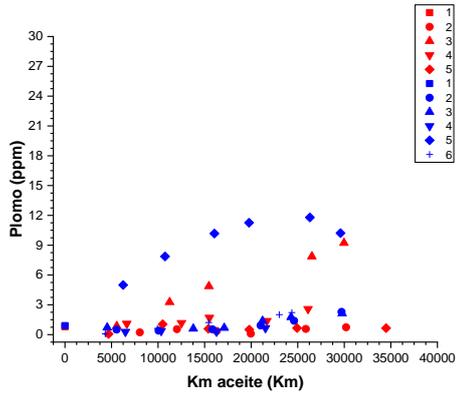


Figura 83: Diésel Euro IV - Plomo

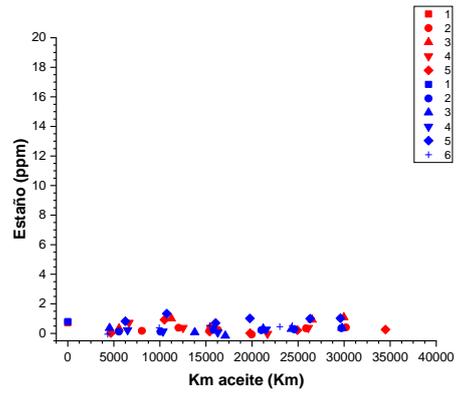


Figura 84: Diésel Euro IV - Estaño

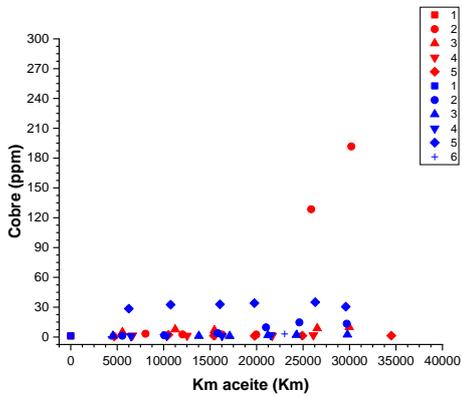


Figura 85: Diésel Euro IV - Cobre

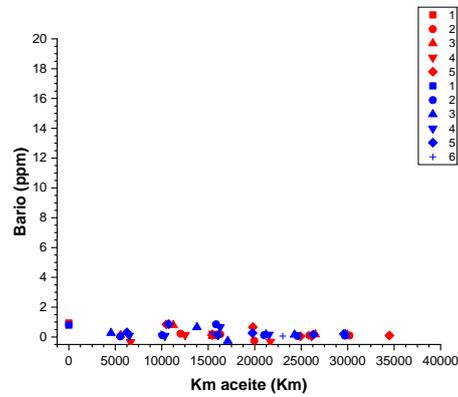


Figura 86: Diésel Euro IV - Bario

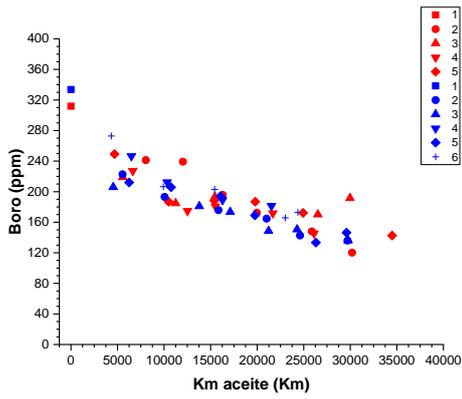


Figura 87: Diésel Euro IV - Boro

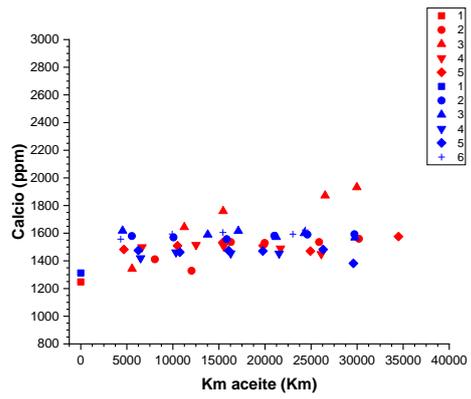


Figura 88: Diésel Euro IV - Calcio

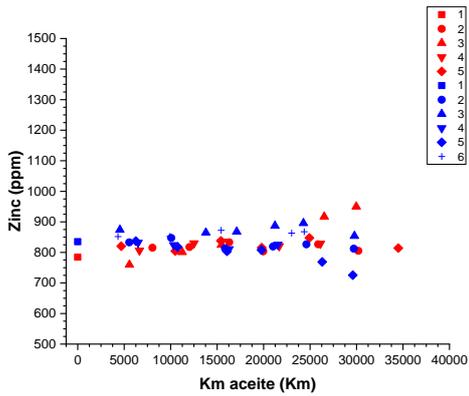


Figura 89: Diésel Euro IV - Zinc

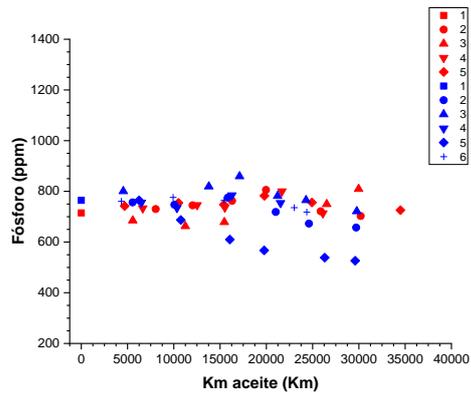


Figura 90: Diésel Euro IV - Fósforo

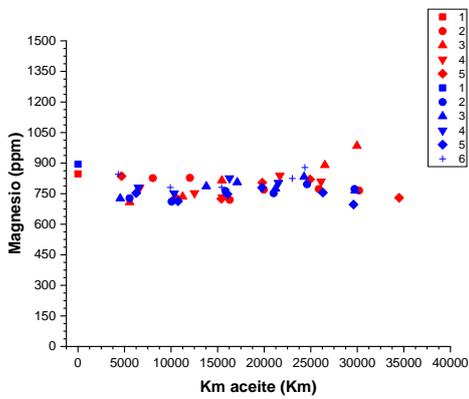


Figura 91: Diésel Euro IV - Magnesio

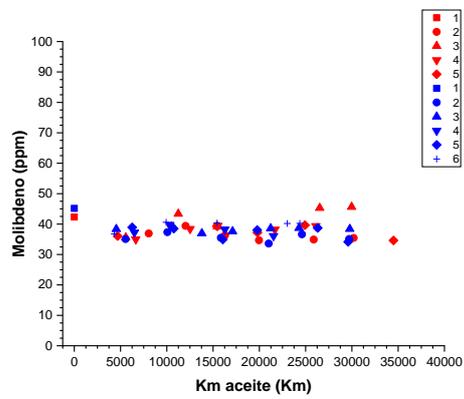


Figura 92: Diésel Euro IV - Molibdeno

- Degradación

Atendiendo a los valores de viscosidad se puede observar como el comportamiento de ambos aceites es similar. Por un lado, los valores de viscosidad cinemática a 40°C aumentan muy ligeramente mientras que, por otro lado, los valores de viscosidad a 100°C se mantienen prácticamente constantes.

Respecto al nivel de acidificación sufrido, se aprecia un aumento hasta un valor máximo cercano a 4 mg KOH/g. La reserva básica sufre un descenso significativo porque a pesar de no descender por debajo de 4 mg KOH/g sí que sufre una caída superior al 50% respecto a su valor inicial medido.

Tanto la evolución de la oxidación como la de la nitración presenta una tendencia ascendente con valores muy similares entre ambos tipos de aceites. Cabe destacar que los vehículos con un nivel de oxidación superiores se deben a una serie de problemas concretos como el aumento del nivel de sodio.

En cuanto al nivel de aditivación, para los aditivos amínicos se mantiene un comportamiento estable. En contraposición, los aditivos antidesgaste presentan un agotamiento más destacable, siendo todavía más pronunciado en aquellos vehículos con problemas relacionados con el sodio. Ambos fenómenos se observan más detenidamente con el estudio de la evolución del RUL Number, el cual presenta un valor muy por debajo del 40% en el momento del cambio.

- Contaminación

El principal problema relacionado con la contaminación del lubricante se ha producido en una serie de vehículos puntuales que han sido contaminados por sodio. Este elemento es característico del líquido refrigerante, pero, al no presentar valores excesivos, se considera que no hay fugas del sistema refrigerante. Este fenómeno puede ser debido al uso de diferentes tipologías de líquidos refrigerantes a lo largo de la prueba realizada.

Los vehículos que presentan la contaminación por sodio contienen, además, valores significativamente elevados de silicio en comparación con los otros vehículos.

- Desgaste

El comportamiento frente al desgaste de todos los motores no contaminados con sodio es el esperado, sin presentar unas variaciones excesivas de ninguno de los elementos.

5.4.4. Resultados GNC EEV

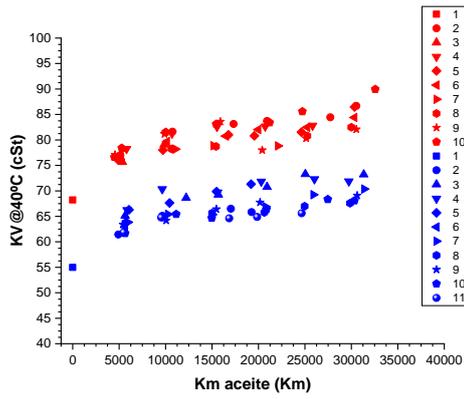


Figura 93: GNC EEV - KV a 40°C

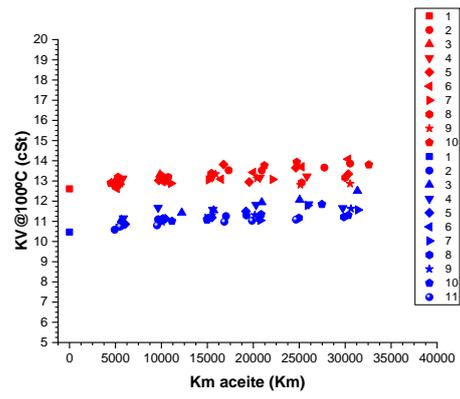


Figura 94: GNC EEV - KV a 100°C

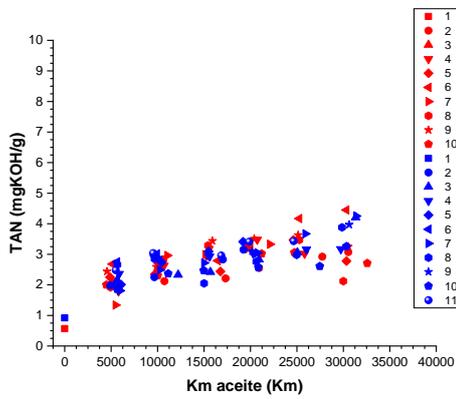


Figura 95: GNC EEV - TAN

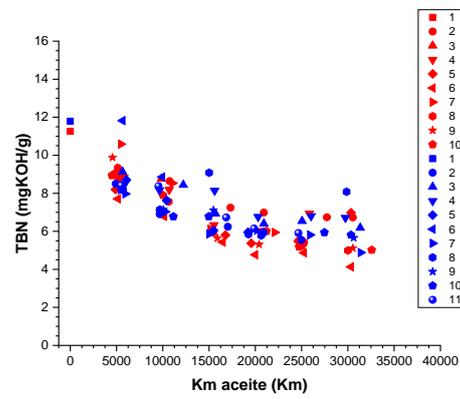


Figura 96: GNC EEV - TBN

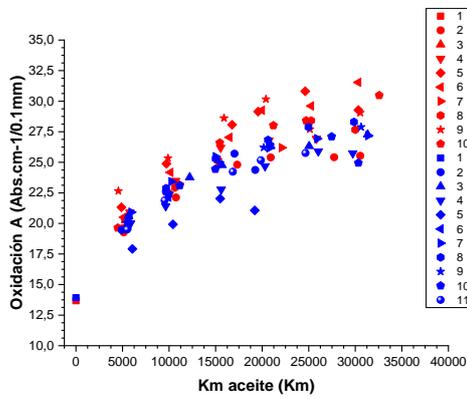


Figura 97: GNC EEV - Oxidación

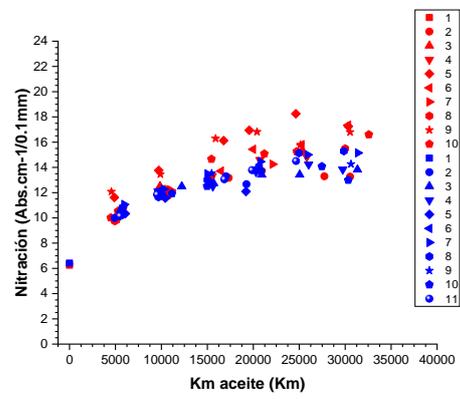


Figura 98: GNC EEV - Nitración

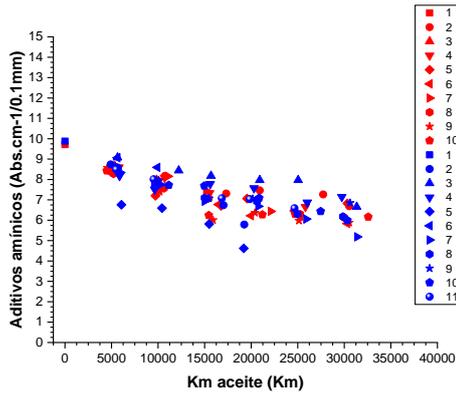


Figura 99: GNC EEV - Ad. amínicos

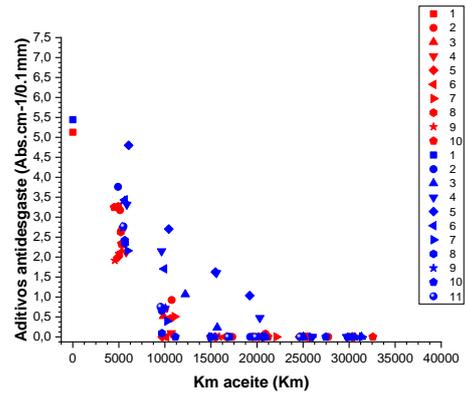


Figura 100: GNC EEV - Ad. antidesgaste

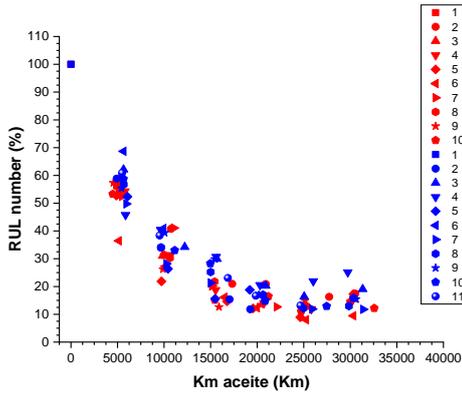


Figura 101: GNC EEV - RUL Number

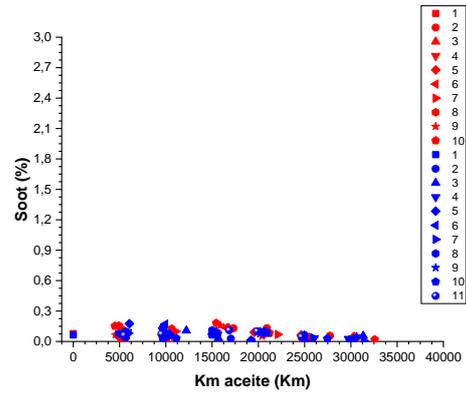


Figura 102: GNC EEV - Soot

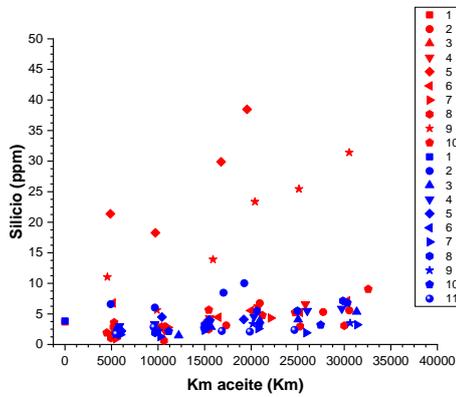


Figura 103: GNC EEV - Silicio

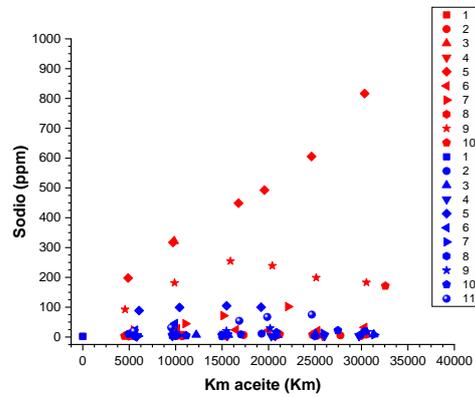


Figura 104: GNC EEV - Sodio

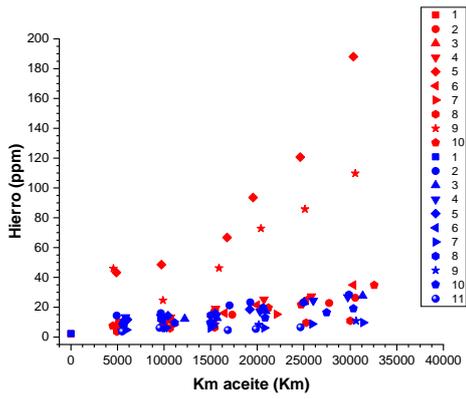


Figura 105: GNC EEV - Hierro

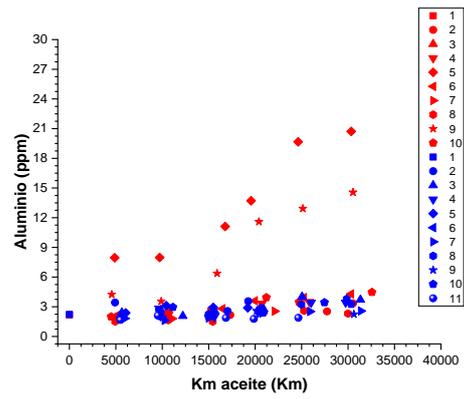


Figura 106: GNC EEV - Aluminio

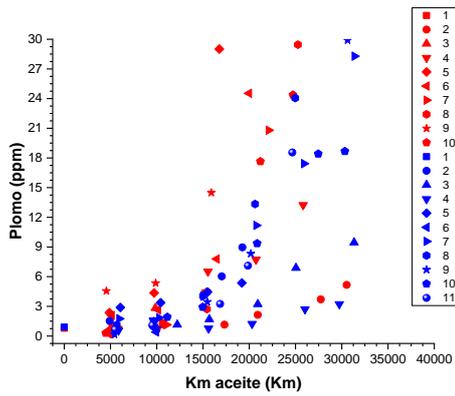


Figura 107: GNC EEV - Plomo

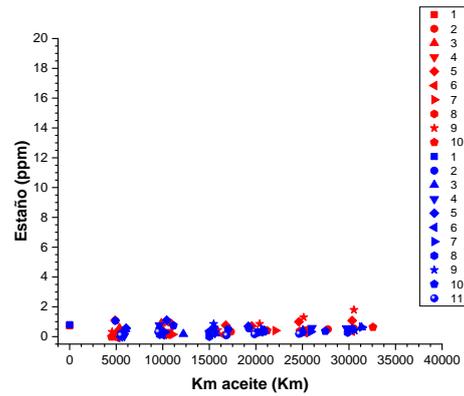


Figura 108: GNC EEV - Estaño

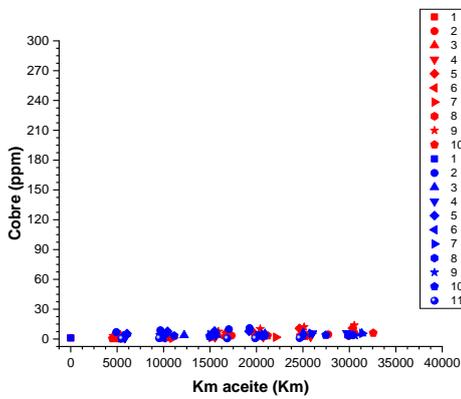


Figura 109: GNC EEV - Cobre

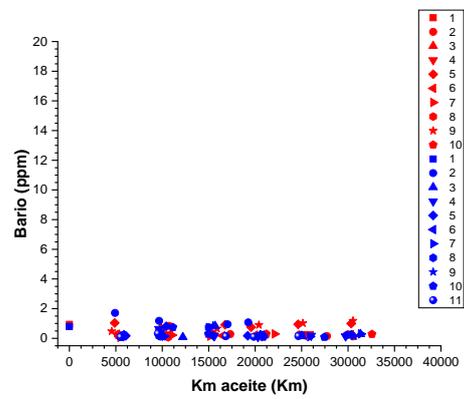


Figura 110: GNC EEV - Bario

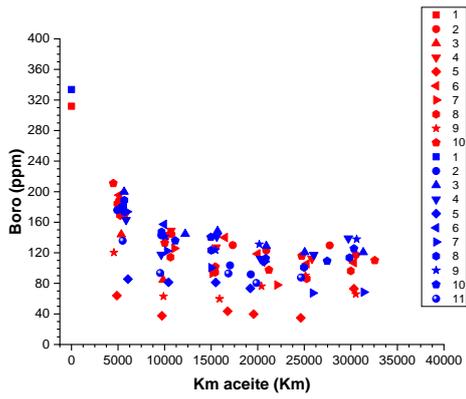


Figura 111: GNC EEV - Boro

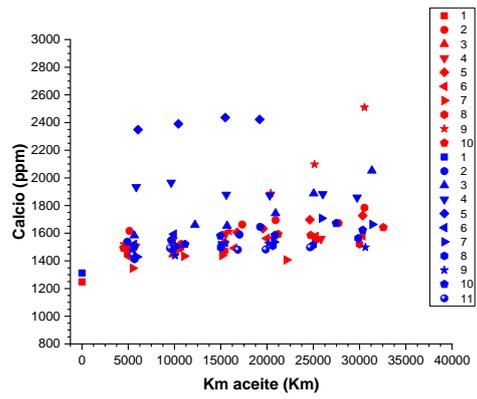


Figura 112: GNC EEV - Calcio

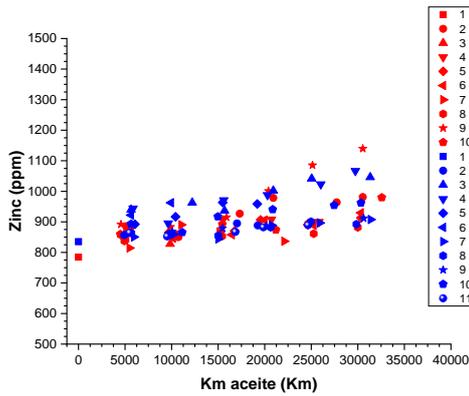


Figura 113: GNC EEV - Zinc

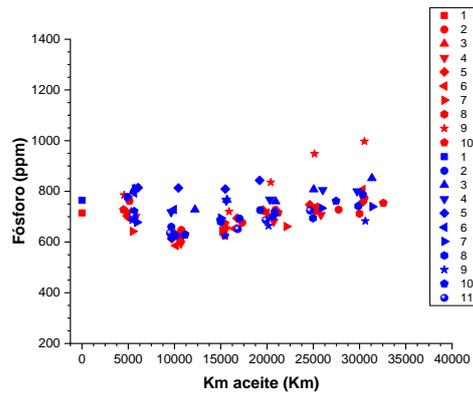


Figura 114: GNC EEV - Fósforo

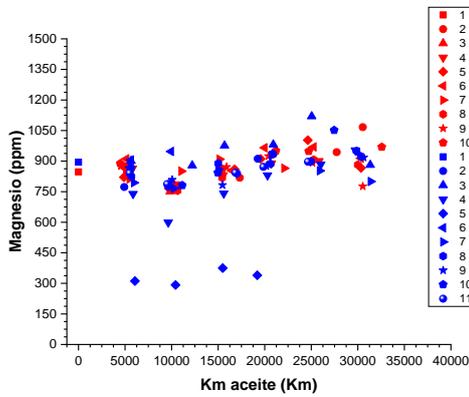


Figura 115: GNC EEV - Magnesio

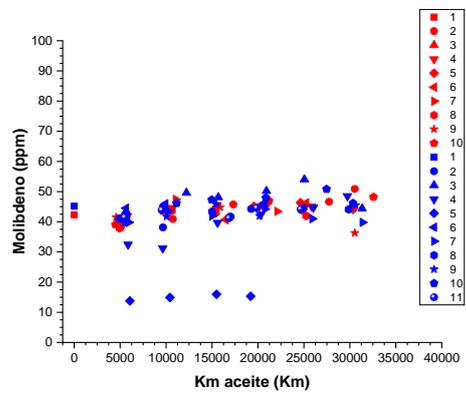


Figura 116: GNC EEV - Molibdeno

- Degradación

En cuanto a la viscosidad, este tipo de vehículo presenta una mayor sollicitación térmica que los motores diésel. A través de este fenómeno, se produce un aumento de oxidación térmica que repercute en una variación mucho mayor y apreciable de la viscosidad de los lubricantes a 40°C y a 100°C.

Al igual que en el resto de vehículos, el nivel de acidificación se sitúa en un valor cercano a 4 mg KOH/g en el momento de realizar el cambio de aceite. Por otro lado, el nivel de la reserva básica nunca desciende del valor de 4 mg KOH/g, pero sí que se encuentra por debajo del 50% del valor al empezar la prueba.

Como se ha comentado en la interpretación de la viscosidad, los valores de oxidación son ligeramente superiores en este tipo de tecnología por su mayor demanda térmica, mientras que los valores de nitración no sufren una alteración con respecto al resto de vehículos.

Los aditivos amínicos se consumen a lo largo de la prueba, pero no se llegan a agotar. Este fenómeno sí que ocurre con los aditivos antidesgaste, los cuales se agotan antes de alcanzar un tercio del kilometraje de la prueba. Este fenómeno observable a través del RUL Number, indica que la tecnología de motor GNC agota más rápidamente los aditivos que la tecnología de motor diésel.

- Contaminación

Se observa una serie de vehículos con contaminación por sodio con una tendencia creciente prácticamente constante, por lo que es esperable una fuga del circuito de refrigeración sobre el sistema de lubricación. Es característico, además, el aumento también constante de silicio sobre los mismos vehículos contaminados con sodio ya que ambos elementos presentan una tendencia de aumento similar.

- Desgaste

El desgaste de los motores se observa a través de los valores de plomo medidos y un aumento de los mismo a partir de la mitad de la prueba, momento justo en el que los aditivos antidesgaste se agotan. Además, como resultado esperable por la contaminación con silicio, los valores elevados de hierro y aluminio en los vehículos afectados.

5.5. Comportamiento de las formulaciones estudiadas

Para unificar el estudio se representan todos los modelos de autobús sobre la misma gráfica. En este caso, cada modelo se representa mediante un símbolo diferente en el gráfico, manteniendo el cuadrado para los aceites nuevos. Al igual que en el caso anterior, cada color se asocia con un aceite diferente, siendo verde el aceite A, rojo el aceite B y azul el aceite C.

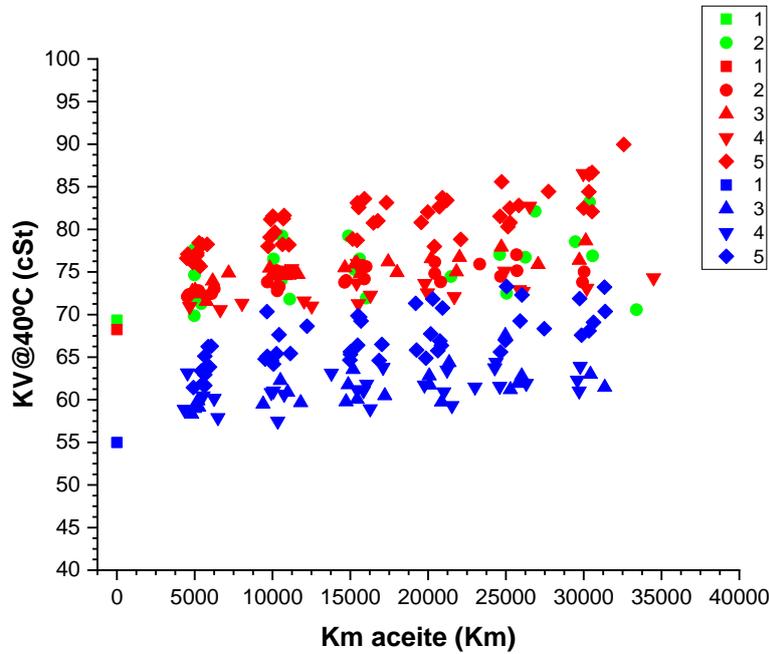


Figura 117: Viscosidad cinemática a 40°C del aceite A (verde), aceite B (rojo) y aceite C (azul)

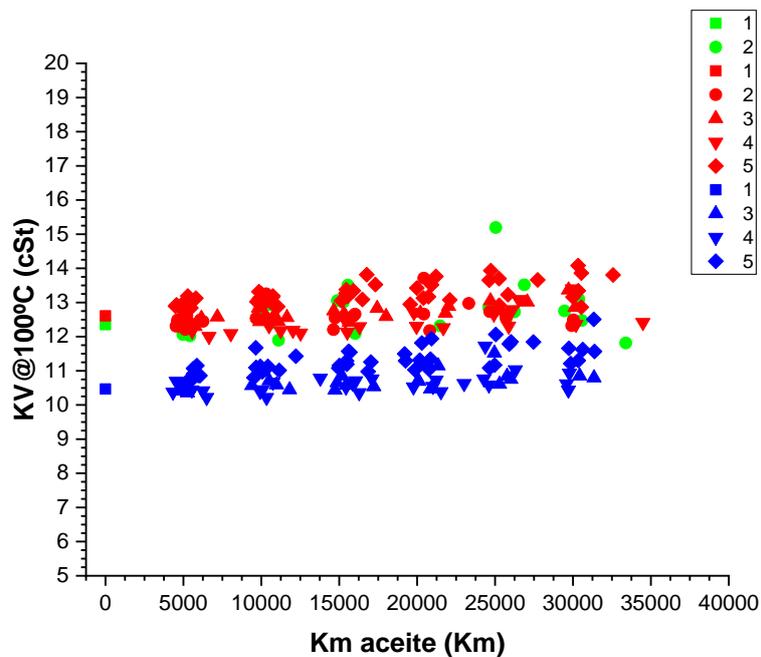


Figura 118: Viscosidad cinemática a 100°C del aceite A (verde), aceite B (rojo) y aceite C (azul)

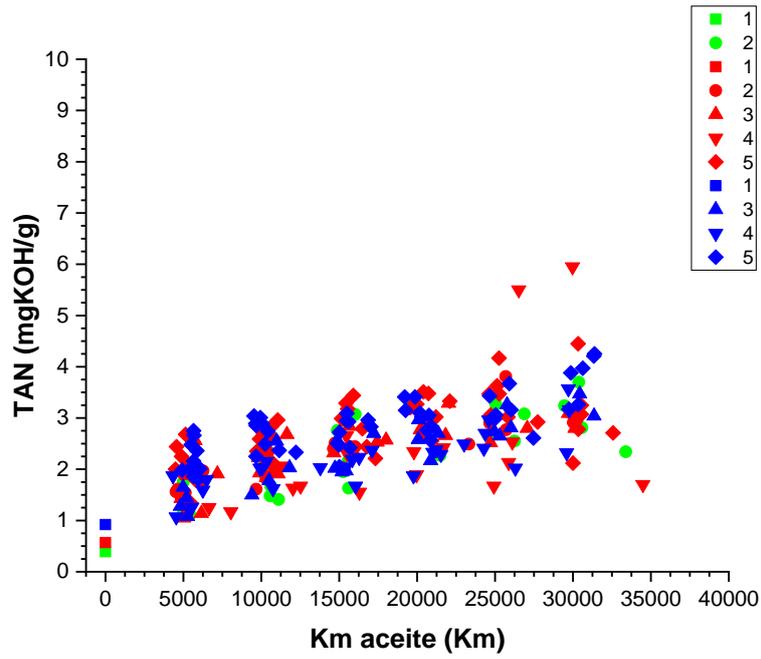


Figura 119: TAN del aceite A (verde), aceite B (rojo) y aceite C (azul)

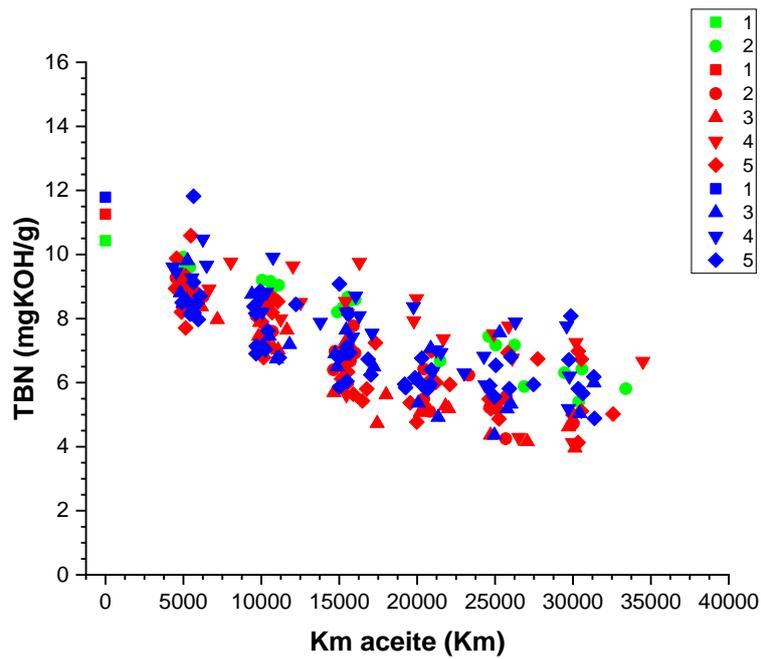


Figura 120: TBN del aceite A (verde), aceite B (rojo) y aceite C (azul)

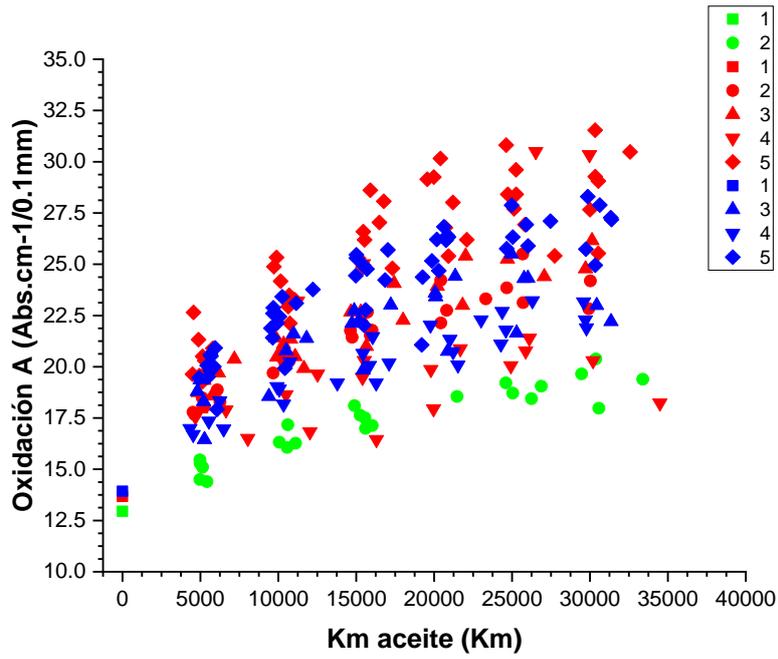


Figura 121: Oxidación del aceite A (verde), aceite B (rojo) y aceite C (azul)

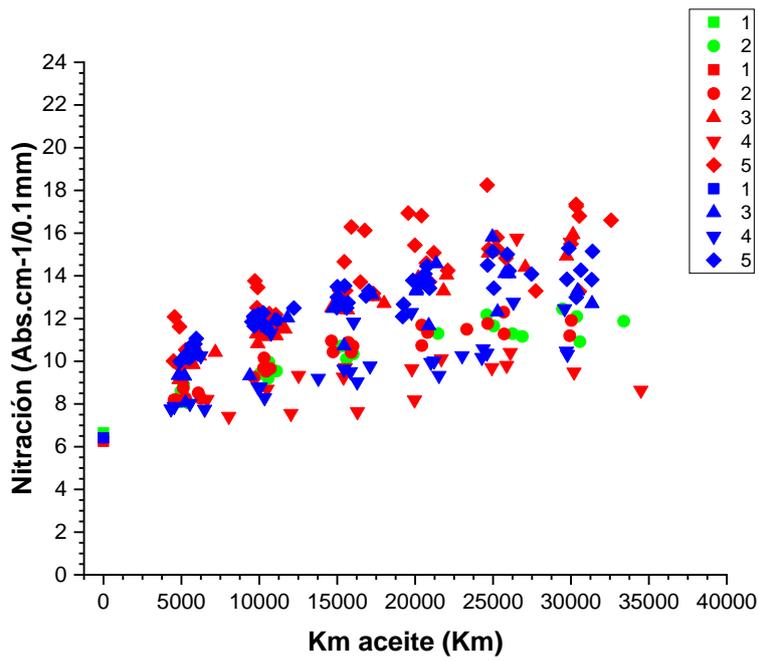


Figura 122: Nitración del aceite A (verde), aceite B (rojo) y aceite C (azul)

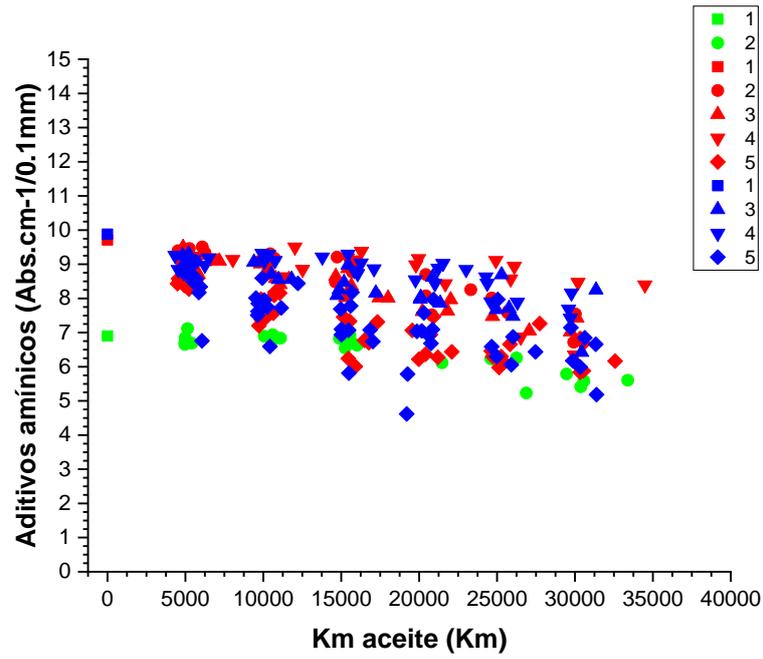


Figura 123: Aditivos amínicos del aceite A (verde), aceite B (rojo) y aceite C (azul)

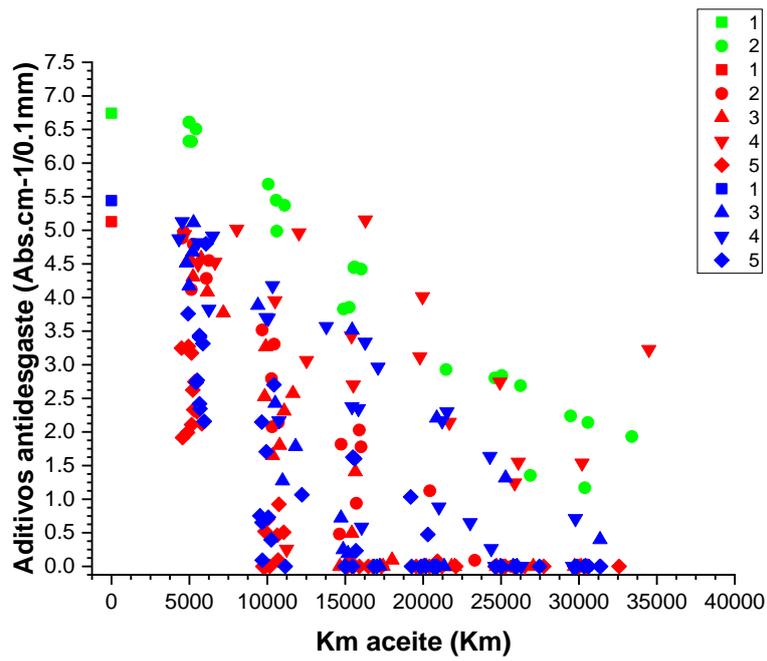


Figura 124: Aditivos antidesgaste del aceite A (verde), aceite B (rojo) y aceite C (azul)

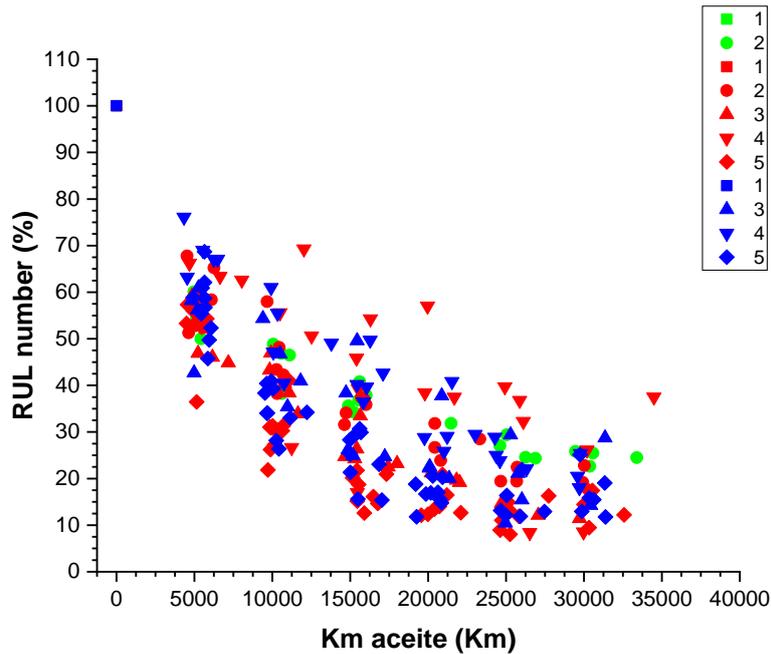


Figura 125: RUL Number del aceite A (verde), aceite B (rojo) y aceite C (azul)

El comportamiento general de los aceites ha cumplido las expectativas esperadas ante las exigencias que se iban a sufrir. Las nuevas formulaciones estudiadas cumplen sus funciones manteniendo el periodo de cambio de aceite actual, pero a la vista de los resultados, no se recomienda ampliar dicho periodo de cambio de aceite a un periodo superior a 30.000 km.

El parámetro más afectado a lo largo de toda la prueba ha sido la degradación de los aditivos antidesgaste, los cuales generalmente ya estaban agotados antes de cumplir dos tercios del periodo total (20.000 km). Asociado a ello, la reserva básica también ha visto reducida su valor por debajo del 50% antes de los 20.000 km, pero este fenómeno tiene menor importancia que el paquete de aditivación porque los combustibles empleados en los vehículos contienen un nivel de azufre mínimo. Tanto los niveles de oxidación como los de acidificación son considerablemente altos, lo cual afecta al rápido consumo y degradación de los aditivos antidesgaste con la consecuente aparición de metales de desgaste blandos como el plomo, el cual comienza una tendencia creciente en su contenido a partir de la mitad de la prueba.

El agotamiento de los aditivos antidesgaste se observa también a través del contenido en boro medido mediante espectrometría ICP. El aceite B y el aceite C son los únicos que poseen en su formulación este aditivo metálico y, a través de sus resultados, se observa un descenso y un consumo que se asocia con el de los aditivos antidesgaste.

La formulación del refrigerante utilizado en esta flota de autobuses contiene un compuesto de sodio. De esta manera, a través del análisis del contenido de sodio en los vehículos, se puede determinar si existe una fuga en el circuito refrigerante que desemboque en el sistema de lubricación. El hecho de que las condiciones de trabajo exijan una alta temperatura propicia que el contenido de agua del refrigerante se evapore, detectando así fugas de este fluido mediante la monitorización del contenido de sodio.

6. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

6.1. Conclusiones

El desarrollo de este trabajo basado en la monitorización de los aceites lubricantes ha permitido extraer como conclusión principal un resultado satisfactorio en el análisis de las nuevas formulaciones. Este resultado se considera positivo debido a que el uso de las nuevas formulaciones no penaliza el desgaste del motor, logrando así un ahorro de combustible con la mejora de la eficiencia de los MCIA.

Tras observar los resultados obtenidos se puede determinar que los aceites lubricantes de baja viscosidad no presentan comportamientos nocivos para el MCIA. En cuanto al periodo de cambio de aceite estipulado, los aceites de baja viscosidad han presentado un excelente rendimiento, pero no se puede justificar una ampliación del periodo de uso sin comprometer a la fiabilidad del MCIA.

A continuación, se presentan las conclusiones secundarias relacionadas con las propiedades y los parámetros controlados a lo largo de la prueba y observando que no hay variaciones de riesgo:

- Los valores del índice de acidez y basicidad son relativamente altos a pesar de no contar con azufre en los combustibles. Este fenómeno puede ser debido al carácter básico de los aditivos y su agotamiento a lo largo de la prueba.
- La oxidación y la nitración presentan valores elevados sobre todo tras el agotamiento de los aditivos antioxidantes. Este fenómeno guarda relación con la tecnología del MCIA, ya que los motores GNC poseen una demanda térmica mayor que los motores diésel.
- Tanto la formulación del aceite lubricante como la tecnología del motor tienen influencia en el consumo de los aditivos, observado un rápido agotamiento en los aditivos antioxidantes sobre los aditivos amínicos o antidesgaste.
- El uso de aceites de baja viscosidad no se ha traducido en una variación en el comportamiento asociado al desgaste ya que todos los aceites utilizados en la prueba han sido capaces de soportar el estrés termo-mecánico de los MCIA. Los posibles fallos asociados al desgaste se deben al agotamiento de un aditivo específico o a problemas en otros sistemas.

Adicionalmente, se han obtenido diferentes conclusiones derivadas tras realizar el estudio principal como una adecuada gestión de la flota mediante la selección de vehículos y la distribución de aceites, la realización de un plan de muestreo y toma de muestras acertado y un análisis preciso en el laboratorio.

Por último, realizar especial énfasis en la importancia de la implementación de tareas de *Oil Condition Monitoring* con el objetivo de prevenir fallos con un coste económico asociado muy elevado.

6.2. Trabajos futuros

El desarrollo de este trabajo permite continuar la investigación con los siguientes trabajos futuros propuestos:

- Una opción a explorar consiste en la reducción del grado de viscosidad SAE utilizados en la prueba para analizar el comportamiento de dichos aceites sobre los MCIA en función de la tipología del motor. Concretamente, la demanda mecánica en los motores con tecnología GNC permite realizar un estudio alternativo reduciendo el grado SAE a 5W20.
- Otra opción de estudio es la extrapolación de la metodología utilizada en este trabajo para analizar otras tipologías de MCIA. Actualmente, con el auge de los motores con tecnologías híbridas, se puede ampliar el conocimiento sobre la influencia del diseño de dichos motores y el comportamiento de los aceites de baja viscosidad.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Roa, L. R. (2016). *Contribution to the Assessment of the Potential of Low Viscosity Engine Oils to Reduce ICE Fuel Consumption and CO2 Emissions* (Doctoral dissertation, Universitat Politècnica de València).
- [2] Tormos, B., Miró Mezquita, G., Pérez-Gutiérrez, T., & de-Diego-Pardo, J. (2016). Aceites de motor de baja viscosidad: ahorro de combustible y ensayos en condiciones reales. *DYNA Ingeniería e Industria*, 91(6), 668-674.
- [3] Fygueroa, S. (1994). *Diagnóstico de motores de encendido por compresión de automoción mediante análisis del lubricante* (Doctoral dissertation, Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia. España).
- [4] Macián, V., Tormos, B., & Olmeda, P. (2008). Fundamentos de ingeniería del Mantenimiento. *Editorial de la Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España*.
- [5] Martínez, B. T. (2005). *Diagnóstico de motores diesel mediante el análisis del aceite usado*. Reverté.
- [6] Machinerylubrication.com. 2021. *Base Oil Groups Explained*. [online] Available at: <https://www.machinerylubrication.com/Read/29113/base-oil-groups?utm_content=158086191&utm_medium=social&utm_source=linkedin&utm_channel=lcp-1539344> [Accessed 1 April 2021].
- [7] Rudnick, L. R. (Ed.). (2017). *Lubricant additives: chemistry and applications*. CRC press.
- [8] Machinerylubrication.com. 2021. *Dynamic vs. Kinematic Viscosity: What's the Difference?* [online] Available at: <https://www.machinerylubrication.com/Read/31591/dynamic-kinematic-viscosity?utm_content=157528845&utm_medium=social&utm_source=linkedin&utm_channel=lcp-1539344> [Accessed 1 April 2021].
- [9] ASTM International. (2016). *D2270-10(2016) Standard Practice for Calculating Viscosity Index from Kinematic Viscosity at 40 °C and 100 °C*. Retrieved from <https://doi.org/10.1520/D2270-10R16>
- [10] SAE International. (2015). *SAE J300 Engine Oil Viscosity Classification*. Retrieved from https://doi.org/10.4271/J300_201501
- [11] Api.org. 2021. *Oil Categories*. [online] Available at: <<https://www.api.org/products-and-services/engine-oil/eolcs-categories-and-classifications/oil-categories>> [Accessed 1 April 2021].
- [12] ACEA. (2016). *ACEA 2016 Oil Sequences*. Inf. téc. Bruxelles.
- [13] Tormos Martínez, B. V., Olmeda González, P. C., Gomez Estrada, Y. A., & Galar, D. (2013). Monitoring and analysing oil condition to generate maintenance savings: a case study in a CNG engine powered urban transport fleet. *Insight-Non-Destructive Testing & Condition Monitoring*, 55(2), 84-87.

- [14] Macian, V., Tormos, B., Miro, G., & Pérez, T. (2016). Assessment of low-viscosity oil performance and degradation in a heavy duty engine real-world fleet test. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 230(6), 729-743.
- [15] Macián, V., Tormos, B., Olmeda, P., & Gómez, Y. A. (2015). Findings from a fleet test on the performance of two engine oil formulations in automotive CNG engines. *Lubrication Science*, 27(1), 15-28.
- [16] Miró Mezquita, G. (2017). *Estudio del comportamiento y de la influencia en el desgaste de los aceites lubricantes de baja viscosidad en MClA* (Doctoral dissertation, Universitat Politècnica de València).
- [17] ASTM International. (2019). *ASTM D445-19a Standard Test Method for Kinematic Viscosity of Transparent and Opaque Liquids (and Calculation of Dynamic Viscosity)*. Retrieved from <https://doi.org/10.1520/D0445-19A>
- [18] ASTM International. (2017). *ASTM D8045-17e1 Standard Test Method for Acid Number of Crude Oils and Petroleum Products by Catalytic Thermometric Titration*. Retrieved from <https://doi.org/10.1520/D8045-17E01>
- [19] Metrohm.com. 2021. *Determination of the total base number in petroleum products*. [online] Available at: <<https://www.metrohm.com/en/applications/AB-405>> [Accessed 1 April 2021].
- [20] Fentress, A., Sander, J., & Ameye, J. (2011). The use of linear sweep voltammetry in condition monitoring of diesel engine oil. *Journal of ASTM International*, 8(7), 1-10.
- [21] ASTM International. (2014). *ASTM D7590-09(2014) Standard Guide for Measurement of Remaining Primary Antioxidant Content in In-Service Industrial Lubricating Oils by Linear Sweep Voltammetry*. Retrieved from <https://doi.org/10.1520/D7590-09R14>
- [22] ASTM International. (2014). *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*. Retrieved from <https://doi.org/10.1520/D6971-09R14>
- [23] ASTM International. (2013). *ASTM D6810-13 Standard Test Method for Measurement of Hindered Phenolic Antioxidant Content in Non-Zinc Turbine Oils by Linear Sweep Voltammetry*. Retrieved from <https://doi.org/10.1520/D6810-13>
- [24] Macián, V., Tormos, B., Gómez, Y. A., & Salavert, J. M. (2012). Proposal of an FTIR methodology to monitor oxidation level in used engine oils: Effects of thermal degradation and fuel dilution. *Tribology transactions*, 55(6), 872-882.
- [25] Gómez Estrada, Y. A. (2013). *Contribución al desarrollo y mejora para la cuantificación de la degradación en aceites lubricantes usados de MClA a través de la técnica de espectrometría infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR)* (Doctoral dissertation, Universitat Politècnica de València).
- [26] ASTM International. (2018). *ASTM E2412-10(2018) Standard Practice for Condition Monitoring of In-Service Lubricants by Trend Analysis Using Fourier Transform Infrared (FT-IR) Spectrometry*. Retrieved from <https://doi.org/10.1520/E2412-10R18>

- [27] ASTM International. (2020). *ASTM D7214-20 Standard Test Method for Determination of the Oxidation of Used Lubricants by FT-IR Using Peak Area Increase Calculation*. Retrieved from <https://doi.org/10.1520/D7214-20>
- [28] ASTM International. (2018). *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*. Retrieved from <https://doi.org/10.1520/D7412-18>
- [29] ASTM International. (2018). *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*. Retrieved from <https://doi.org/10.1520/D7414-18>
- [30] ASTM International. (2018). *ASTM D7415-18 Standard Test Method for Condition Monitoring of Sulfate By-Products in In-Service Petroleum and Hydrocarbon Based Lubricants by Trend Analysis Using Fourier Transform Infrared (FT-IR) Spectrometry*. Retrieved from <https://doi.org/10.1520/D7415-18>
- [31] ASTM International. (2018). *ASTM D7624-18 Standard Test Method for Condition Monitoring of Nitration in In-Service Petroleum and Hydrocarbon-Based Lubricants by Trend Analysis Using Fourier Transform Infrared (FT-IR) Spectrometry*. Retrieved from <https://doi.org/10.1520/D7624-18>
- [32] ASTM International. (2020). *ASTM D7844-20 Standard Test Method for Condition Monitoring of Soot in In-Service Lubricants by Trend Analysis using Fourier Transform Infrared (FT-IR) Spectrometry*. Retrieved from <https://doi.org/10.1520/D7844-20>
- [33] Garzón Poyatos, L. (2015). *Definición y aplicación de metodologías de análisis elemental mediante espectrometría de emisión atómica en aceites lubricantes y combustibles* (Doctoral dissertation, Universitat Politècnica de València).
- [34] ASTM International. (2018). *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)*. Retrieved from <https://doi.org/10.1520/D5185-18>
- [35] Montoro Moreno, L. (2008). *Contribución al desarrollo y mejora de técnicas para la detección y análisis de partículas metálicas y contaminantes en aceites lubricantes usados* (Doctoral dissertation, Universitat Politècnica de València).
- [36] Machinerylubrication.com. 2021. *The Basics of Used Oil Sampling*. [online] Available at: https://www.machinerylubrication.com/Read/650/used-oil-sampling?utm_content=158086207&utm_medium=social&utm_source=linkedin&hss_channel=lcp-1539344 [Accessed 1 April 2021].