

Universidad Internacional del Ecuador



Escuela de Ingeniería Mecánica Automotriz

Trabajo de Integración Curricular

**Artículo Investigación para la obtención del Título de Ingeniero en Mecánica
Automotriz**

**ANÁLISIS DE LA TENDENCIA DE DESGASTE DE UN MOTOR DE
ENCENDIDO POR COMPRESIÓN UTILIZADO EL ANÁLISIS DE ACEITE
USADO. CASO DE ESTUDIO: BUS DE TRANSPORTE URBANO**

**Daniel Michael Quishpe Soria
Steven Joel Tigse Toasa**

Director: Ing. Denny Guanuche Msc.

Quito, abril 2022

CERTIFICACIÓN

Por medio del presente certificado doy a conocer que el artículo presentado es la autoría de Daniel Michael Quishpe Soria, declaro bajo juramento que el trabajo presentado aquí es de mi propiedad intelectual, este documento no ha sido presentado anteriormente en ningún grado o certificado profesional y que se ha consultado la bibliografía detallada.



Daniel Michael Quishpe Soria

CI:



Steven Joel Tigse Toasa

CI:

Yo, Ing. Denny Guanuche, certifico que conozco a los autores de la presente investigación, siendo el responsable exclusivo tanto de su originalidad y de su autenticidad, como de su contenido.



Ing. Denny Javier Guanuche Larco MSc.

CI.

DIRECTOR

CERTIFICACIÓN

Yo, Daniel Michael Quishpe Soria declaro que la investigación denominada: “ANÁLISIS DE LA TENDENCIA DE DESGASTE DE UN MOTOR DE ENCENDIDO POR COMPRESIÓN UTILIZADO EL ANÁLISIS DE ACEITE USADO. CASO DE ESTUDIO: BUS DE TRANSPORTE URBANO” es de mi autoría y no ha sido presentado anteriormente para ningún grado académico y que se ha respetado todos los derechos intelectuales de terceros, dichas fuentes consultadas se añaden en la bibliografía de esta investigación.

Cedo los derechos de propiedad intelectual a la Universidad Internacional del Ecuador, para que sea publicado y divulgado en medios digitales e impresos, según lo establecido en la Ley de Propiedad Intelectual.



DEDICATORIA

Este proyecto se lo dedico en primero lugar a Dios, que fue quien ha sabido sostenerme en aquellos momentos que como estudiante sentía caer. Así mismo lo dedico a mis padres quienes desde un inicio fueron mi pilar, mi ejemplo a seguir tanto en la parte espiritual como en la parte humana y profesional, han sido quienes confiaron ciegamente en mí y supieron apoyarme en cada etapa para que no me rindiera. Por último, se lo dedico también a mi esposa e hijo, quienes son ahora mi motor e inspiración para alcanzar las metas propuestas.

Daniel Michael Quishpe Soria

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por haberme acompañado y guiado a lo largo de mi carrera mediante la intersección del Sagrado Corazón de Jesús, por ser mi fortaleza en los momentos de debilidad y por brindarme una vida llena de aprendizajes, experiencias y sobre todo felicidad espiritual.

Daniel Michael Quishpe Soria

DEDICATORIA

El presente trabajo investigativo lo dedico principalmente a Dios, por ser el inspirador y darme fuerza para continuar en este proceso de obtener uno de mis anhelos más deseados.

A mis padres, por su amor, trabajo y sacrificio en todos estos años, gracias a ellos he logrado llegar hasta aquí y convertirme en lo que soy. Ha sido el orgullo y el privilegio de ser su hijo, son los mejores padres.

A mis hermanos y hermana, por estar siempre presentes, acompañándome y por el apoyo moral, que me han brindado a lo largo de esta etapa de mi vida.

A todas las personas que me han apoyado y han hecho que el trabajo se realice con éxito en especial a aquellos que me abrieron las puertas y compartieron sus conocimientos.

Tnlgo. Steven Joel Tigse Toasa

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por bendecir mi vida, por guiarme a lo largo de mi existencia, ser el apoyo y fortaleza en aquellos momentos de dificultad y debilidad.

Gracias a mis padres: Fausto y Rocío, por ser los principales promotores de mi sueño, por confiar y creer en mis expectativas, por los consejos, valores y principios que me han inculcado.

Agradezco a los docentes de la Escuela de Ingeniería Mecánica Automotriz de la UIDE, por haber compartido sus conocimientos a lo largo de la preparación de mi profesión; Finalmente quiero expresar mi más grande y sincero agradecimiento a mi pareja Michelle por su apoyo y paciencia en este proyecto de estudio.

Tnlgo. Steven Joel Tigse Toasa

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIÓN	II
DEDICATORIA.....	IV
ÍNDICE DE FIGURAS	VII
ÍNDICE DE TABLAS	VIII
ÍNDICE DE ECUACIONES.....	VIII
RESUMEN.....	IX
ABSTRACT.....	IX
1. INTRODUCCIÓN	1
2. MARCO TEORICO.....	1
2.1 LUBRICANTES Y DESGASTE.....	1
2.2 TRANSPORTE URBANO DE QUITO	2
2.3. MOTOR DE ENCENDIDO POR COMPRESIÓN	2
3. MATERIALES Y MÉTODOS	3
3.1 MÉTODO.....	3
3.2 MATERIALES.....	3
3.3 PRUEBAS.....	3
3.3.1. LUBRICANTE DE PRUEBA	4
3.3.2. VISCOSIDAD RELATIVA.....	4
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	4
4.1 VISCOSIDAD.....	4
4.2 SILICIO.....	5
4.3 HIERRO	5
4.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS	5
5. CONCLUSIONES	6
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	6
ANEXOS.....	8

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Función del lubricante	2
Figura 2. Bus tipo	3
Figura 3. Viscosidad relativa para muestras obtenidas	4
Figura 4. Partículas de silicio en las muestras de aceite.....	5
Figura 5. Partículas de hierro en las muestras de aceite.....	5

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Vehículos de pruebas.....	3
Tabla 2. Pruebas de análisis de metales y tribología.....	3
Tabla 3. Propiedades de aceite (muestra virgen).....	4
Tabla 4. Viscosidad de las muestras de lubricante	4

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Viscosidad relativa.....	4
---	---

ANÁLISIS DE LA TENDENCIA DE DESGASTE DE UN MOTOR DE ENCENDIDO POR COMPRESIÓN UTILIZADO EL ANÁLISIS DE ACEITE USADO. CASO DE ESTUDIO: BUS DE TRANSPORTE URBANO

Denny Guanuche¹; Michael Quishpe², Steven Joel Tigse³

Ingeniero Automotriz, deguanuchela@uide.edu.ec, Quito -Ecuador

² *Ingeniería Automotriz Universidad Internacional del Ecuador, miquishpe@uide.edu.ec*

³ *Ingeniería Automotriz Universidad Internacional del Ecuador, sttigseto@uide.edu.ec*

RESUMEN

Introducción: El transporte público constituye una alternativa importante al transporte individual, sobre todo en ciudades con alto flujo de vehículos particulares. Este proyecto, se orienta en evaluar la condición de desgaste del motor por encendido por compresión en un vehículo de transporte urbano, con base a la técnica de análisis de lubricante usado, para la recolección de la información y análisis de los resultados obtenidos. **Metodología:** La investigación se desarrolló con el uso del método cuantitativo, los procesos de medición y recolección de datos estaban basados en las normas de aceites lubricantes vinculado a las propiedades físicas químicas para el análisis de la degradación de los motores encendido por compresión tipo N1 en la ciudad de Quito. **Resultados:** La medición la viscosidad indican una degradación máxima promedio del 43,5% del lubricante en los motores analizados. En relación con la concentración de partículas de silicio se observa un crecimiento del 15%, sin evidencia de una contaminación ambiental del aire. En relación con el desgaste, la concentración de partículas de hierro es bajo con incremento del 12%. **Conclusión:** Los buses urbanos operan bajo condiciones atmosféricas tolerables, no se evidencia grandes cantidades de silicio, no se evidencia niveles de desgaste abrasivo o corrosivo, a la vez, los niveles de partículas de hierro muestran una variabilidad del 8,5%, evidencia una baja tendencia de desgaste adhesivo, vinculado a la lubricación.

PALABRAS CLAVES: aceites lubricantes, ingeniería de mantenimiento, tribología, transporte

ABSTRACT

Introduction: Public transport is an important alternative to individual transport, especially in cities with a high flow of private vehicles. This project is aimed at evaluating the condition of wear of the engine by compression ignition in an urban transport vehicle, applying the used lubricant analysis technique, for the collection of information and analysis of the results obtained. **Methodology:** The research was developed using the quantitative method, the measurement and data collection processes were based on the ASTM standards for the physical-chemical properties of lubricants for the analysis of the degradation of compression ignition engines type N1 in the city Quito. **Results:** Viscosity maximum measurements indicate a degradation of 43,5 % of the lubricant of the analyzed engines. In relation to the concentration of silicon particles, a growth of 15% is observed, without evidence of environmental air pollution. In relation to wear, the concentration of iron particles is low with an increase of 12%. **Conclusion:** Urban buses operate under tolerable atmospheric conditions, large amounts of silicon are not evidenced, there is no evidence of abrasive or corrosive wear levels, at the same time, the levels of iron particles show a variability of 8.5%, evidence of a low tendency for adhesive wear, linked to lubrication.

KEY WORDS: oil, maintenance engineering, tribology, transportation

1. INTRODUCCIÓN

El transporte público constituye una alternativa importante al transporte individual, sobre todo en ciudades con alto flujo de vehículos particulares. “Argumentos a favor del uso del transporte público con frecuencia se centran en el costo, la disponibilidad y el impacto ambiental” [1]. Las empresas transportistas de servicio público, tienen un interés evidente en monitorear su desempeño para reducir los costos y aumentar la disponibilidad.

El Distrito Metropolitano de Quito (DMQ), al ser una ciudad encerrada entre montañas y con posibilidades de expansión únicamente lineales, la movilidad es uno de los mayores problemas, que afecta e influye en la economía urbana, la seguridad vial y la calidad de vida de la población; debido a que no tiene un desarrollo vial adecuado y cuya capacidad está superada en relación a la demanda y movilidad; además se agrava año tras año con el “crecimiento del parque automotor con una tasa del 11% anual” [2]. La movilidad relacionada al transporte público debe fundamentarse en programas y proyectos apropiados, para lograr un desarrollo urbano acorde a la situación de la ciudad.

Los vehículos en el mercado nacional, recurren generalmente al mantenimiento correctivo como la alternativa de solución de los fallos presentes en el vehículo. El motor constituye un elemento indispensable en el funcionamiento del vehículo, necesario la aplicación del mantenimiento predictivo, como una herramienta de búsqueda del periodo

óptimo de la operación más crítica para la vida del vehículo, como es el caso del cambio de aceite del motor [3,4].

Los motores de los buses del transporte público de Quito, se afectan por la calidad del combustible, debido al contenido de azufre en el diésel, que incide también en las emisiones contaminantes del motor.

Este proyecto, se orienta en evaluar la condición de desgaste del motor por encendido por compresión en un vehículo de transporte urbano, con base a la técnica de análisis de lubricante usado, para la recolección de la información y análisis de los resultados obtenidos.

2. MARCO TEORICO

2.1 LUBRICANTES Y DESGASTE

Los lubricantes poseen propiedades físicas y químicas que determinan el tipo de aplicación y durabilidad en su funcionamiento. Dentro de estas propiedades se destacan la viscosidad, siendo la propiedad más importante del lubricante. Para la clasificación de los aceites de uso automotriz, se utiliza la norma SAE J300, basado en la viscosidad del aceite, diferencia al aceite monogrado de los aceites multigrado, por ejemplo, un aceite SAE 10W-30, es un aceite multigrado, ya que posee una viscosidad a baja temperatura y otra diferente a alta temperatura, por ello. La norma SAE, divide la clasificación de los aceites en 11 grados de viscosidad, subdivididos en grados de invierno y grados de verano.

La función esencial del lubricante es reducir la fricción y el desgaste, al no controlar estos factores, se origina daños

críticos en los sistemas o equipos, por ello, las funciones del lubricante se mejoran con el paquete de aditivos, que se añade a la base del lubricante. Estos aditivos permiten mejorar los tiempos de cambio de aceites o actuar sobre condiciones operativas específicas. Los tipos de aditivos principales son antioxidantes, antidesgaste, dispersantes, anticorrosivos, detergentes (figura 1), y de extrema presión.

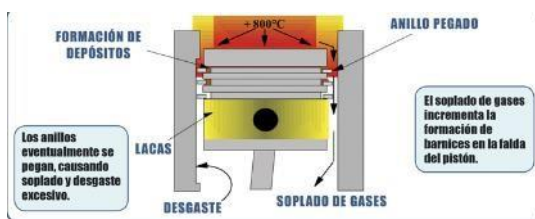


Figura 1. Función del lubricante

(Ramírez, 2015)

El monitoreo del aceite usado es una de las herramientas más valiosas empleado en el campo del mantenimiento predictivo, “con la finalidad de comprobar y diagnosticar el estado de los elementos mecánicos de una máquina” [4]. Las técnicas de análisis de aceite aplicadas al mantenimiento, se pueden clasificar según su finalidad en:

- “Técnicas para la determinación de la degradación del aceite
- Técnicas para la cuantificación de la contaminación de aceite
- Técnicas para la identificación y cuantificación de las partículas de desgaste en el aceite usado” [5].

Este tipo de técnicas permite identificar los diferentes elementos en una muestra de aceite, para evaluar el origen de las partículas dentro de un motor de combustión interna.

2.2 TRANSPORTE URBANO DE QUITO

En Quito, el actual sistema de transporte constituye un sistema desintegrado, de baja calidad de servicio, que atiende a los segmentos de demanda bajo esquemas tradicionales ineficientes. Las distintas líneas de buses urbanos convencionales no se articulan adecuadamente entre sí ni con el subsistema Metrobús-Q. Los viajes en transporte público de Quito están atendidos “por 3.131 unidades (buses tipo, articulados, trolebuses y minibuses), distribuidos en 60 operadoras de los cuales el 90% son buses convencionales y el restante 10% son buses articulados y trolebuses que operan en las troncales de los corredores BRT” [9].

2.3. MOTOR DE ENCENDIDO POR COMPRESIÓN

El motor de encendido por compresión (MEC), se fundamenta en los trabajos desarrollados por Rudolph Diesel, cuyos trabajos se remontan a 1892, la combustión del motor, se basa en la presión constante, utiliza como combustible el hidrocarburo denominado Diesel, con un número de cetano de 50. [10, 11].

Las aplicaciones del motor Diésel, es similar al de los motores de encendido de chispa, se debe destacar las aplicaciones, en grandes motores Diesel lentos en aplicaciones navales y maquinaria, así como, los motores Diesel rápido, para el transporte de personas y carga.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 MÉTODO

Es un proceso de investigación vinculado al análisis de la degradación de los motores encendido por compresión tipo N1 a través del análisis de aceites. Los procesos de medición y recolección de datos estaban basados en las normas ASTM (indicadas en la tabla 2), para las propiedades físicas químicas de los lubricantes. La investigación se llevó a cabo en la ciudad de Quito, ubicada en una zona geográfica de elevación a 2800 metros sobre el nivel del mar.

3.2 MATERIALES

En la ciudad de Quito, el sistema transporte público ha renovado la flota de buses, “a través de diferentes normativas regulatorias, a la vez, se da un incremento de 2,5% de unidades en este sector” [10]. La marca representativa en el mercado de buses tipo, constituye la marca Hino, por ello, este estudio, utilizó dos vehículos de prueba, según las características detalladas en la tabla 1.

Tabla 1. Vehículos de pruebas

Marc a	Modelo	Año de model o	País	Sistema de inyecció n
HINO	AK8JRS A 7.7 3P 4X2 TM DIESEL	2018	JAPO N	Riel común

Fuente: (Hino, 2019)

En la figura 2, se muestra el vehículo de pruebas.



Figura 2. Bus tipo

(Quishpe, 2021)

3.3 PRUEBAS

El análisis del aceite usado de las muestras obtenidas de los motores de los vehículos, se efectúa en los laboratorios de Tribologik (Canadá) bajo la acreditación ISO 17025, por parte del Organismo de Acreditación Ecuatoriano. Las pruebas efectuadas, se muestra en la tabla 2.

Tabla 2. Pruebas de análisis de metales y tribología.

Prueba	Parámetro determinado	Unidades	Método
Espectrometría ICP	Máximo 22 elementos metálicos y no metálicos	ppm	ASTM D-5185
Espectrometría IR	Calidad y contaminación del lubricante	N/A	JOAP
Contaminación	Agua por Karl Fischer	ppm	ASTM D-4928
Propiedad química	TBN	mg KOH/g	ASTM D-2896

(Tribologik, 2021)

La muestra de aceite usado, se obtiene en intervalo de 5000 km, acorde a las intervenciones de mantenimiento efectuados por los propietarios de los vehículos. La recolección de información se efectúa por 25000 km, contabilizando 5 muestras por vehículo de prueba.

3.3.1. LUBRICANTE DE PRUEBA

Para el estudio, se referencia el lubricante de los vehículos de prueba, estableciendo la línea base del lubricante, es decir, se determinan las propiedades físicas y químicas, como se muestra en la tabla 3. Para los motores se emplea el mismo tipo de aceite marca Caterpillar SAE 15W-40. La especificación del aceite es la recomendación del fabricante del vehículo y utilizado en la mayoría de los vehículos de la flota que compone la Cooperativa de Transporte.

En la tabla 3, se muestra las características del aceite virgen utilizado en los vehículos de pruebas.

Tabla 3. Propiedades de aceite (muestra virgen).

IDENTIFICACIÓN	15W- 40
ELEMENTOS	
Fe-Hierro	-
Al-Aluminio	4.1
Mo- Molibdeno	75
Ti-Titanio	66
Si-Silicio	4
Mg-Magnesio	25
B-Boro	8.3
Na-Sodio	-
Ca-Calcio	2328
P-Fosforo	1023
Zn-Zinc	1177
PROPIEDADES	
Viscosidad	14,1
TBN	8,6

(Tribologik, 2021)

3.3.2. VISCOSIDAD RELATIVA

Para el análisis de viscosidad, se establece el parámetro de la viscosidad relativa, definida por la ecuación 1, con base a los datos de viscosidad del lubricante nuevo y el lubricante usado.

$$Z_{visc} = \frac{\text{Viscosidad medida}}{\text{Viscosidad referencial}} \quad \text{Ec. [1]}$$

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 VISCOSIDAD

El parámetro esencial de la salud del lubricante es la viscosidad. En la tabla 4, se tabulan los resultados de la viscosidad de las muestras del lubricante

Tabla 4. Viscosidad de las muestras de lubricante

Muestra	Viscosidad [cSt]	
	V1	V2
1	7,3	8,6
2	10,4	12,6
3	11,1	10,2
4	14,3	11,6
5	9,1	10,7

(Tribologik, 2021)

Para la comparación apropiada se utiliza la viscosidad relativa. En la figura 2, se muestra la variación de la viscosidad relativa (z) para ambos vehículos de pruebas.

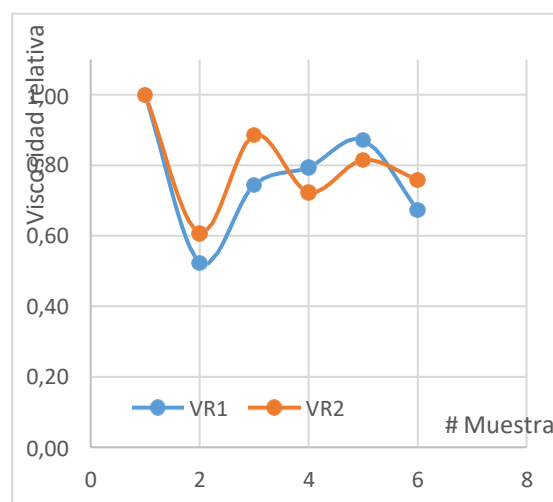


Figura 2. Viscosidad relativa para muestras obtenidas

(Quishpe, 2021)

La viscosidad relativa se calcula con la ecuación 1, utilizando los datos de la tabla 3 y los datos medidos en cada una de las muestras. En base a los resultados obtenidos, se grafican, en la figura 2, para cada vehículo de pruebas. En el vehículo se identifica una reducción máxima del 48% y una mínima del 23%. En el vehículo 2, se obtiene una reducción máxima del 39% y una mínima del 21%.

En promedio se obtiene una degradación máxima de 43,5 %. por ello, se identifica una alta degradación del aceite durante la operación dentro del motor para un recorrido de 5000 km.

4.2 SILICIO

El silicio, es una partícula con vínculo al aire atmosférico que circunda al motor en operación, en la figura 3, se muestra el comportamiento del silicio de los vehículos de pruebas.

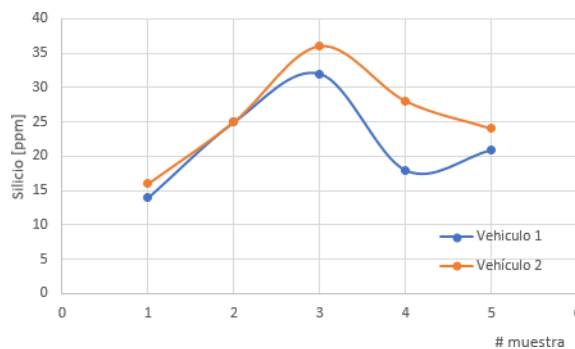


Figura 3. partículas de silicio en las muestras de aceite

(Quishpe, 2021)

En el vehículo 2, se muestra un mayor nivel de silicio con una diferencia total del 15% en las partículas encontradas en las muestras de aceite. En el vehículo 1, se identifica una medición máxima de 32 ppm y en el vehículo 2, se identifica una medición máxima de 36 ppm. La variación depende de las rutas que ejecutan los

vehículos de pruebas, al exponer a ambientes diferentes.

4.3 HIERRO

Las partículas de hierro, provenientes de los componentes del motor, se depositan en el aceite del motor. Los resultados se muestran en la figura 4.

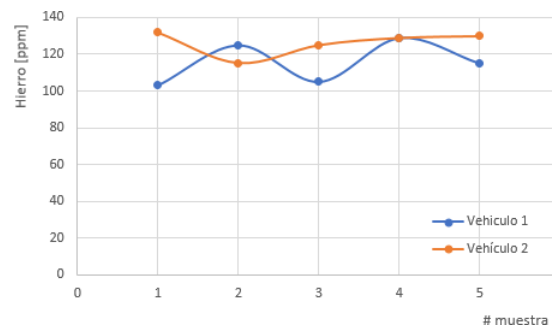


Figura 4. partículas de hierro en las muestras de aceite

(Quishpe, 2021)

Al comparar las partículas de hierro, entre los dos vehículos, se muestra una diferencia global del 8,5%, bajo esta consideración, se establece un incremento del nivel de partículas de hierro. La medición máxima del vehículo 1 es de 125 ppm y la medición máxima en el vehículo 2 es de 130 ppm. Las características del combustible constituyen un factor en las variaciones de los aditivos del aceite y las partículas presentes en la muestra, ya que altera las condiciones de la combustión.

4.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

El silicio se vincula con las partículas que ingresan por el aire para la mezcla aire-combustible, por ello, con una variabilidad mayor en el vehículo 1, con margen del 25%, descartándose la presencia de

partículas contaminantes de alto volumen en el aire atmosférico.

En el caso de las partículas de hierro, se observa que la contaminación ambiental no tiene incidencia en la presencia de una mayor cantidad de partículas de hierro, en las muestras obtenidas, con una mayor variabilidad en el vehículo 1, en relación de hasta el 15%.

El aceite utilizado en el vehículo, se degrada en márgenes del 43,5 %, acorde a estudios similares, desarrollados los autores citados [3], [4] y [10], el combustible con altos niveles de azufre puede influir en una rápida degradación del aceite del motor.

5. CONCLUSIONES

Los aceites utilizados en este proyecto sufren una reducción de la viscosidad del 43,5%, es necesario, considerar cambios en los periodos de cambio de aceites, para mejorar la operatividad de los motores de encendido por compresión de los buses urbanos analizados.

Los buses urbanos operan bajo condiciones atmosféricas tolerables, no se evidencia grandes cantidades de silicio, no se evidencia niveles de desgaste abrasivo o corrosivo.

Los niveles de partículas de hierro muestran una variabilidad del 8,5%, evidencia una baja tendencia de desgaste adhesivo, vinculado a la lubricación.

El análisis de aceites combinado con una herramienta estadística constituye un aporte a los procesos de mejora de mantenimiento vehicular, se requiere la incorporación de estas herramientas para

profundizar las respuestas de mantenimiento.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] V. Macián, B. Tormos, G. Miró y T. Pérez, «Assessment of low-viscosity oil performance and degradation in a heavy duty engine real-world fleet test.,» *Proc IMechE Part J: J. Eng. Tribol.*, vol. 230, nº 6, pp. 729-740, 2016.
- [2] S. Celi, «Análisis del sistema de transporte público privado de la ciudad de Quito,» *Espacios*, vol. 39, nº 19, pp. 1-8, 2018.
- [3] V. Macian, B. Tormos, G. Miro y T. Pérez, «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*, vol. 230, nº 6, pp. 729-743., 2016.
- [4] B. Tormos, Diagnóstico de motores diésel mediante el análisis del aceite usado, España: Reverte, 2013.
- [5] Secretaria de Movilidad, «Elementos claves entorno a la estructura tarifaria,» 2019. [En línea]. Available: http://www7.quito.gob.ec/mdmq_ordenenanzas/Circulares/2019/019-INSUMOS%20PROYECTO%20ORD.%20ESTRUCTURA%20TARIFARIA-SISTEMA%20TRANSPORTE%20PUBLICO/ANEXO.pdf. [Último acceso: 04 2021].
- [6] S. Bauset, P. González, V. M. Martínez y B. Tormos, «El

- mantenimiento de las flotas de transporte.,» *Técnica industrial*, vol. 247, pp. 42-47, 2002.
- [7] V. Macián, B. Tormos, J. M. Salavert y S. Ballester, «Methodology applied for maintenance technical audit in urban transport fleets,» *Journal of Quality in Maintenance Engineering.*, vol. 16, nº 1, pp. 34-43, 2010.
- [8] H. Raposo, J. Torres Farinha, I. Fonseca y D. Galar, «Predicting condition based on oil analysis – A case study.,» *Tribology International*, vol. 135, nº 2, pp. 65-74, 2019.
- [9] S. Cabascango, J. Antamba, L. Corrales y J. Guerra, «Diagnóstico de la condición de desgaste basado en el análisis de aceite usado. Caso de estudio: Vehículo de servicio de taxi,» *ConcienciaDigital*, vol. 3, nº 2, pp. 18-28, 2020.
- [10] V. Macian, B. Tormos, Y. Gomez y V. Bermúdez, «Revisión del proceso de la degradación en los aceites lubricantes en motores de gas natural comprimido y diesel,» *Dyna Ingeniería e Industria*, vol. 88, nº 1, pp. 49-58., 2013.
- [11] V. Macián, B. Tormos, A. García-Barberá y A. Tsolakis, «Macián, V., Tormos, B., García-Barberá, A., & Tsolakis, A. (2021). Applying chemometric procedures for correlation the FTIR spectroscopy with the new thermometric evaluation of Total Acid Number and Total Basic Number in engine oils.,» *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, vol. 208, nº 104215, 2021.
- [12] B. Tormos, P. Olmeda, Y. Gomez y D. Galar, «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*, vol. 55, nº 2, pp. 84-87, 2013.
- [13] D. C. Montgomery y D. V. Verbeeck, *Control estadístico de la calidad*, Madrid: Limusa Wiley, 2004.
- [14] M. Gómez-Gómez, C. Danglot-Banck y L. Vega-Franco, «Cómo seleccionar una prueba estadística (segunda parte),» *Revista mexicana de pediatría*, vol. 80, nº 2, pp. 81-85, 2013.
- [15] T. Savković, M. Miličić, P. Pitka, I. Milenković y D. Kolečka, «Evaluation of the eco-driving training of professional truck drivers,» *Oper. Res. Eng. Sci. Theory Appl*, vol. 2, nº 1, 2019.
- [16] H. Zhao, *Advanced Direct Injection Combustion Engine Technologies and Development*, UK: Woodhead Publishing , 2009.

ANEXOS

Cat[®] DEO-ULS[™]

Aceite del motor API CK-4

SAE 15W-40 y 10W-30



Diseñado para ofrecer protección y rendimiento óptimos en motores de servicio pesado

Cat[®] DEO-ULS[™] está exclusivamente formulado y optimizado para proporcionar el más alto nivel de protección y rendimiento en una amplia variedad de aplicaciones del motor, incluidas aquellas que requieren sistemas de postratamiento.

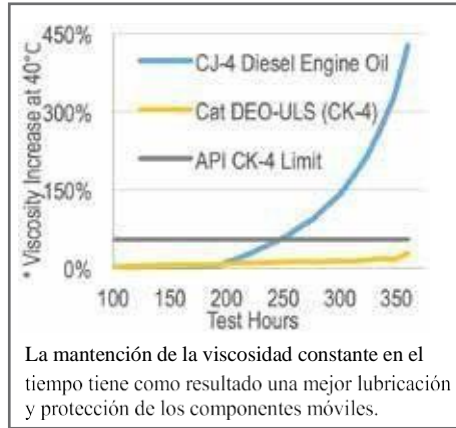
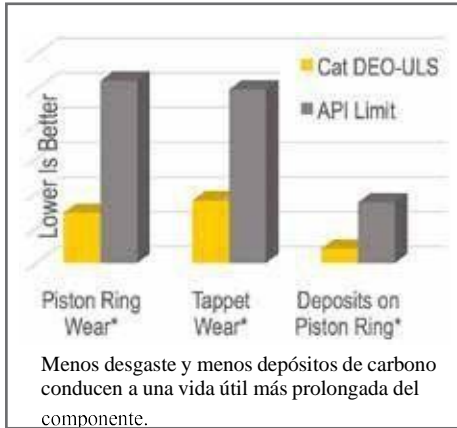
Cat-DEO-ULS:

- Supera los requisitos de rendimiento o API CK-4
- Es compatible con las categorías de aceite API anteriores
- Proporciona óptimos rendimiento, durabilidad y vida útil del motor
- Se puede usar en todos los motores que requieren API CK-4 o una categoría API anterior de aceite para motor diésel (consulte su OMM [Operation and Maintenance Manual, Manual de Operación y Mantenimiento])

Beneficios	
Reducción de los depósitos en el motor	La oxidación y la estabilidad térmica disminuyen los depósitos en el motor y proporcionan una protección más uniforme en todo el intervalo de drenaje del aceite.
Aireación reducida	La aireación reducida da como resultado una mayor protección contra la descomposición, la cavitación y la corrosión del aceite.
Propiedades de cizalladura mejoradas	Las propiedades de cizalladura mejoradas permiten que el aceite mantenga una viscosidad constante en condiciones de carga alta, lo que proporciona mejor lubricación y protección para los componentes móviles.
Mayor protección	Los aditivos y el componente de base superior especialmente diseñados entregan protección y durabilidad óptimas para el motor, al mismo tiempo que respaldan el rendimiento uniforme de las emisiones.



Cat DEO-ULS supera los requisitos de API CK-4



* Pruebas estándar de la industria: prueba Mack T12 de desgaste del anillo del pistón, prueba Cummins ISB de desgaste del botador, prueba Caterpillar C13 de depósitos en el anillo del pistón; prueba Volvo T13 de aumento de la viscosidad

Motores diésel API Categorías
API CK-4, CJ-4, CI-4, CI-4 PLUS y CH-4.

Supera los OEM Nivel de rendimiento de:
ECF-3, ECF-2 y ECF-1A de

Se puede usar para:
ACEA E9
Detroit Diésel DFS 93K222
Cummins CES 20086
Volvo Mack VDS STD 417-003

Características típicas*		
Grado de viscosidad SAE	15W-40	10W-30
Punto de encendido, °C (ASTM D92)	225	218
Punto de fluidez, °C (ASTM D97)	-33	-36
Viscosidad		
cSt a 40 °C (ASTM D445)	109	82
cSt a 100 °C (ASTM D445)	14,1	12,0
HTHS a 150 °C, cP (ASTM 4683)	4,1	3,6
Índice de viscosidad	130	142
Fósforo, % de peso (ASTM D4951)	0,10	0,10
Azufre, % de peso (ASTM D2622)	0,24	0,24
Zinc, % de peso (ASTM D4951)	0,12	0,12
Ceniza sulfatada, % de peso (ASTM D874)	0,90	0,90
Volatilidad (ASTM D5800)	9,5	11,30
TBN (ASTM D4793)	8,6	8,7
Densidad a 15,6 °C (ASTM D4052)	0,875	0,868

* Los valores que se muestran son valores típicos y no deben utilizarse como parámetros de calidad a fin de aceptar o rechazar productos. Las especificaciones están sujetas a cambios sin previo aviso.

Aplicaciones

- Los aceites Cat se formulan para proporcionar óptimos rendimiento y protección del motor para todos los motores Caterpillar y hasta los modelos de motor 3500* que operan bajo todas las condiciones y niveles de gravedad, y en todas las aplicaciones
- Son ideales para las flotas mixtas y para camiones de servicio pesado de carretera
- Cumple con los requisitos para motores con dispositivos de postratamiento que requieren de aceite para motor diésel API CK-4 o CJ-4 o Tier 4 (EE.UU.) o Etapa IIIB/IV (UE)
- o normas 2007/2010 de emisiones de escape de vehículos de carretera
- o Japón 2014
- Es compatible con las categorías de aceite API anteriores: API CJ-4, CI-4, CI-4 PLUS y CH-4

* Las recomendaciones de aceite para MUI Marinos 3116 y 3126 y motores diésel MaK[®] se pueden encontrar en el Manual de Operación y Mantenimiento (OMM, Operation and Maintenance Manual).

Estado y seguridad

Para obtener información sobre el uso correcto para la salud, la seguridad y el entorno, consulte la hoja de datos de seguridad de materiales (MSDS, Material Safety Data Sheet). Lea y comprenda la MSDS antes de usar este producto. Siempre cumpla las medidas de higiene adecuadas. Para obtener una copia de la MSDS, comuníquese con nosotros o visite la web en www.catmsds.com

LOS DISTRIBUIDORES CAT UN RESPALDO AL PRODUCTO DE PRIMER

Le ofrecemos las soluciones de servicio y las piezas correctas, en el momento y el lugar que las necesite.

La red de distribuidores Cat de expertos altamente capacitados lo ayudarán a maximizar la inversión de su equipo.

CONSTRUIDA PARA PRODUCIR.



(SP) ANÁLISIS ESPECTROSCÓPICO [ASTM D5185] (elementos observados en ppm)

LOS ELEMENTOS ANALIZADOS SON: Fe, Cu, Pb, Sn, Cr, Al, Ni, Ti, Ag, V, Mg, Si, B, Na, Ba, Ca, P, Mn, Zn, Mo, Cd, K *

* elements below detection limit are not displayed on table

Fecha (DD-MM-AA)	30-11-20	12-12-17	(n/d)	(n/d)	(n/d)	(n/d)	(n/d)	(n/d)
Labno	1451659	1238526						
Fe-HIERRO	103	6.0						
Cu-COBRE	6.0	1.0						
Al-ALUMIN	6.3	4.3						
Cr-CROMO	2.0	-						
Mo-MOLYB	11	81						
Ti-TITANIO	6.0	-						
Si-SILICIO	14	2.0						
Mg-MAGNESIO	52	12						
B-BORO	25	103						
Na-SODIU	4.0	-						
Ba-BARIUM	1.0	-						
Ca-CALCIU	178	2655						
P-FOSFOR	230	839						
Mn-MANG	1.0	-						
Zn-ZINC	99	983						
K-POTASSIUM	5.0	-						

(FTIR) ANÁLISIS INFRARROJO POR TRANSFORMADA DE FOURIER.

Fecha (DD-MM-AA)	30-11-20	12-12-17	(n/d)	(n/d)	(n/d)	(n/d)	(n/d)	(n/d)
Labno	1451659	1238526						
HOLLIN	0	0						
OXIDACION	6	7						
SULFAT O	17	17						
NITRACION	4	6						

HOLLIN (%)

Fecha (DD-MM-AA)	30-11-20	12-12-17	(n/d)	(n/d)	(n/d)	(n/d)	(n/d)	(n/d)
Labno	1451659	1238526						
HOLLIN (%)	0.00	0.00						

VISCOSIDAD/100 [ASTM D445]

Fecha (DD-MM-AA)	30-11-20	12-12-17	(n/d)	(n/d)	(n/d)	(n/d)	(n/d)	(n/d)
Labno	1451659	1238526						
en cSt 100°C	7.93	13.86						

TBN [ASTM D4739] (mg KOH/g)

Fecha (DD-MM-AA)	30-11-20	12-12-17	(n/d)	(n/d)	(n/d)	(n/d)	(n/d)	(n/d)
Labno	1451659	1238526						
NUMERO DE BASE TOTAL	1.54	8.42						

Ensayo de crepitación (%)

Fecha (DD-MM-AA)	30-11-20	12-12-17	(n/d)	(n/d)	(n/d)	(n/d)	(n/d)	(n/d)
Labno	1451659	1238526						
AGUA	<0.1	<0.1						

COMBUSTIBLE [N-NEGATIVO, P-POSITIVO]

Fecha (DD-MM-AA)	30-11-20	12-12-17	(n/d)	(n/d)	(n/d)	(n/d)	(n/d)	(n/d)
Labno	1451659	1238526						
COMBUSTIBLE	N	N						

DETECCION DE GLICOL [N-NEGATIVO, P-POSITIVO]

Fecha (DD-MM-AA)	30-11-20	12-12-17	(n/d)	(n/d)	(n/d)	(n/d)	(n/d)	(n/d)	VIR
Labno	1451659	1238526							
DETECCION DE GLICOL	N	N							-

ING JAIME ANTAMBA 30/11/2020 ,PLANTA

SERTINLAB asume responsabilidad absoluta por el uso y la confianza en los resultados y recomendaciones presentados por Predictive Maintenance Corporation, cuya obligación se limita a la actuación de buena fe. Los límites fijos son programados siguiendo las especificaciones del laboratorio o del cliente.

ING JAIME ANTAMBA 30/11/2020 ,PLANTA

El mantenimiento de las flotas de transporte

Santiago Ballester Bauset
Pablo César Olmeda González
Vicente Macián Martínez
Bernardo Tormos Martínez

La tendencia actual en el mantenimiento integral se orienta a reducir al mínimo el mantenimiento correctivo, optimizar el sistemático y potenciar el predictivo

Los objetivos principales de una flota de transporte de viajeros deben ser la seguridad, la comodidad, la calidad y el cumplimiento del servicio.

Un plan de mantenimiento adecuado debe posibilitar la consecución de estos objetivos garantizando la disponibilidad de los vehículos, disminuyendo las averías imprevistas, aumentando la fiabilidad, permitiendo la optimización de los recursos y en definitiva reduciendo los costes y contribuyendo a la eficiencia global de la empresa sin descuidar el importante aspecto de la conservación del medio ambiente.

Por otra parte, cabe destacar que debido a la necesidad de adaptarse al envejecimiento de los vehículos, la adquisición de nuevos modelos y el desarrollo de las calidades de los componentes y suministros convierten el plan de mantenimiento en un proceso en constante evolución. Esta constante evolución aconseja la implantación del Plan de Mantenimiento Integral, entendiendo como tal, aquél que combina de forma óptima los tres tipos de mantenimiento clásicos (correctivo, preventivo sistemático y preventivo predictivo). Para ello es imprescindible

la utilización de herramientas informáticas para la Gestión del Mantenimiento Asistido por Ordenador (GMAO) y la realización de la Reingeniería del plan de mantenimiento, equivalente al término “Kaizen” de la filosofía japonesa.

La Reingeniería consiste en un replanteamiento de todos los procesos y también utiliza herramientas informáticas, estadísticas y las nuevas filosofías de mantenimiento como son el Mantenimiento Productivo Total (TPM) y el Mantenimiento Basado en la Fiabilidad (RCM).

Optimización de los tipos de mantenimiento

El mantenimiento correctivo es inevitable y se realiza cuando ha surgido el fallo, el objetivo del plan de mantenimiento será la reducción al mínimo valor posible de las operaciones correctivas así como su correcta realización. Para ello los métodos a emplear consisten en la formación de los operarios, el uso de herramientas y repuestos adecuados para garantizar las reparaciones realizadas. Por último, es imprescindible la creación de un archivo

histórico de operaciones realizadas para un mejor control estadístico.

El mantenimiento preventivo sistemático consiste en una serie de operaciones realizadas a intervalos establecidos, que para flotas de transporte, normalmente, son en base a los kilómetros recorridos. El objetivo que se persigue para este tipo de mantenimiento es la optimización de las operaciones y de los periodos de intervención. Para ello hay que determinar el periodo óptimo de la operación más crítica (periodo base) para la vida del vehículo que es, sin duda, el cambio de aceite motor. El valor de este periodo se ve afectado por diversos factores como son la calidad del aceite o el uso del vehículo (urbano o interurbano) entre otros. Por tanto para conocer el estado del aceite es necesario realizar análisis físico-químicos de la degradación (viscosidad, TBN, insolubles, detergencia, constante dieléctrica) a distintos kilometrajes, controlar las reposiciones de aceite y aplicarles herramientas estadísticas para analizar tendencias. Se pretende, por tanto, extender al máximo la vida útil del aceite lubricante, para obtener un



ÁVEL OLIVERES

aprovechamiento total del mismo y establecer, de este modo, el periodo óptimo para realizar el cambio.

Para el establecimiento del resto de operaciones hay que conseguir el mismo objetivo, garantizando siempre la seguridad y la fiabilidad del vehículo. Es muy importante realizar control de niveles diariamente para detectar posibles anomalías que pudiesen agravarse con el tiempo. En cuanto al motor, las operaciones usuales son el

cambio de fluidos y filtros, reglaje de válvulas y limpieza. Del mismo modo en los restantes sistemas se realizan operaciones de cambio de fluidos, engrase y limpieza.

El mantenimiento preventivo predictivo se basa en inspecciones de síntomas (monitorizado) con una frecuencia mínima que es, normalmente, submúltiplo del periodo base. Su objetivo es anticiparse a la aparición de averías mediante el conocimiento del

es aconsejable la combinación de diversas técnicas de monitorizado a través de un sistema experto que recoge el conocimiento de un especialista y que automatiza y homogeneiza todo el proceso.

Técnicas de monitorizado en vehículos

Para el desarrollo del mantenimiento predictivo se emplean diversas técnicas de diagnóstico aplicadas a los distintos sistemas del vehículo. En el caso del motor el objetivo es diagnosticar su estado general (compresión, combustión,

estado o condición del elemento. Para ello se deben aplicar técnicas de diagnóstico, idealmente no intrusivas, para monitorizar el estado de los distintos sistemas del vehículo. La optimización de este tipo de mantenimiento requiere por una parte la determinación correcta de los síntomas a inspeccionar y sus límites de aceptación y rechazo, y por otra parte el diagnóstico de averías. Para el diagnóstico de averías

reglaje, etc.) a través del análisis de prestaciones como la potencia efectiva, compresión en cilindros, y opacidad entre otros. Se presenta a continuación la *tabla 1* con las diferentes técnicas de monitorizado y sus ventajas e inconvenientes. El análisis de prestaciones se complementa con otras técnicas como los análisis rápidos de aceite, las vibraciones y la termografía.

Como se puede observar en la *tabla 1*, se pueden aplicar diversas técnicas para la obtención de un mismo síntoma. En la *figura 1* se observa un equipo de aná-

SÍNTOMA	MÉTODO	VENTAJAS	INCONVENIENTES
---------	--------	----------	----------------

POTENCIA EFECTIVA	Aceleración libre	– No intrusivo – Ensayo en campo	– Motores turbo – Determinar inercia
	Banco de rodillos	– Ensayo en carga – Condiciones reales	– Precio elevado – Instalación fija
COMPRESIÓN	Compresímetro	– Medida directa	– Intrusivo
	Intensidad de arranque	– No intrusivo – Ensayo en campo	– Valor relativo
OPACIDAD	Flujo continuo	– Precisión de medida	– Varias aceleraciones
	Ennegrecimiento papel	– Sencillo	– Sólo un valor
PRESIÓN DE INYECCIÓN	Dilatación de tuberías	– No intrusivo – Rápido	– Subjetivo – Cualitativo

Tabla 1. Ventajas e inconvenientes de las técnicas para el análisis de prestaciones de motores.



Figura 1. Equipo de monitorizado de motores en el Centro de Diagnóstico del CGM de Valencia.

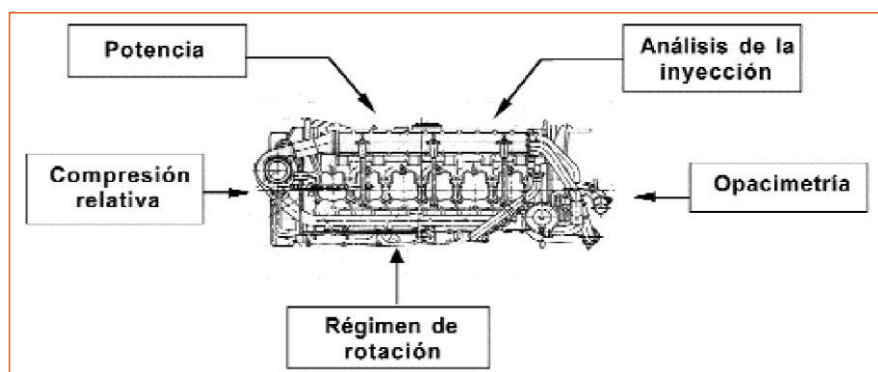


Figura 2. Esquema de técnicas de monitorizado de un motor.

lisis de prestaciones aplicado a motores de automotores diesel de Renfe.

En cuanto a los análisis rápidos de aceite, existen algunos ensayos que permiten determinar el nivel de degradación del lubricante y detectar la contaminación del mismo. Estos ensayos son

rápidos y sencillos, no requieren un gran volumen de muestra y los equipos de diagnóstico suelen ser portátiles. En la *tabla 2* se muestran los diversos análisis y sus ventajas e inconvenientes.

En la *figura 3* se observa un armario con equipos de análisis rápidos de aceites.

SÍNTOMA	MÉTODO	VENTAJAS	INCONVENIENTES
VISCOSIDAD	Ensayo de la rampa	– Sencillo, rápido	– Valor relativo
	Viscosímetro	– Preciso, rápido	– Cálculos posteriores
TBN	Celda química	– Preciso, rápido	– Valor relativo
PRESENCIA DE AGUA	Celda química	– Cuantificación	– Tiempo de ensayo
	Crepitación	– Sencillo, rápido	– Subjetivo
CONSTANTE DIELECTRICA	Capacidad para conducir la electricidad	– Sencillo, rápido	– Impreciso
MATERIA CARBONOSA	Mancha de aceite	– Sencillo	– Cualitativo

Tabla 2. Ventajas e inconvenientes de los análisis rápidos de aceite.

Los análisis rápidos de aceite sirven para determinar el momento en que el aceite comienza a perder sus propiedades o cuando está contaminado. En este último caso es conveniente consultar la posible causa de la contaminación a los laboratorios de análisis especializados para corregir algún desgaste o malfuncionamiento que pueda ocasionar mayores averías en el futuro.

Existe un gran número de técnicas de diagnóstico que pueden utilizarse dependiendo de las características propias de la flota como pueden ser: medida de vibraciones, irregularidad de rotación del régimen del motor, termografía infrarroja, parámetros eléctricos, etc.

En otros sistemas del vehículo como puede ser la dirección, suspensión o el sistema de frenos se emplean equipos de diagnóstico como son placas alineadoras, placa de holguras, frenómetro, etc. Estos equipos necesitan de una instalación fija, lo que supone una mayor inversión en equipamiento. Más adelante, se muestra en la *tabla 3*, los equipos de diagnóstico más usuales para los sistemas de dirección, suspensión y frenos. En el resto de sistemas del vehículo como el aire acondicionado, el sistema neumático o el sistema eléctrico se suelen emplear equipos sencillos como son anemómetros, termopares, termómetros infrarrojos, multímetros, manómetros, etc. Las técnicas anteriormente mencionadas suponen una gran ayuda para la detección precoz de las averías, sin embargo no deben sustituir, sino complementar, la inspección visual periódica de los sistemas del vehículo que consiste en el análisis de fugas, ruidos, estados, etc., que son realizados por operarios instruidos para ello.

Actualmente, los vehículos más modernos, equipan sensores para la detección de fallos “on board” como pueden ser:

- Sensores de espesor de pastillas defreno.
- Sensores de temperatura de admisión, de refrigeración, etc.
- Sensores de presión de aire de frenos, suspensión neumática, etc.
- Sensores de nivel.

Todas las señales de estos sensores se recogen en una unidad central denominada Caja de Diagnóstico desde donde se puede conectar un equipo y leer los fallos almacenados. De este

modo se dispone de mucha más información para el diagnóstico.

Es conveniente, si la magnitud de la flota es suficiente y dado la relevancia que ha cobrado el mantenimiento predictivo, habilitar un espacio en la empresa para la realización del mismo con las instalaciones necesarias para el diagnóstico de vehículos. Este Centro de diagnóstico deberá estar dotado con los equipos de diagnóstico oportunos como pueden ser un frenómetro, placas alineadoras, placa de holguras, opacímetro, regloscopio, banco de rodillo y otros pequeños equipos portátiles anteriormente mencionados. En la *figura 4* se muestran las instalaciones del Centro de Diagnóstico de la EMT de Valencia. Estas instalaciones sirven para la realización de la ITV o de pre-ITV.

En la *figura 5* se muestra el Centro de Diagnóstico de Automotores del Centro General de Mantenimiento de la ciudad Valencia.

Gestión del mantenimiento integral

Para que un plan de mantenimiento sea realmente eficaz se deben optimizar todos los procesos que intervienen en el mismo. La organización de mantenimiento, tradicionalmente, se ha estructurado en gamas de operaciones a distintos kilometrajes múltiples y submúltiplos del periodo base. Este tipo de gamas sería perfecto si los vehículos cumplieran perfectamente los periodos marcados, si no sufrirían averías ni intervenciones entre dos gamas, si no se quedarían operaciones pendientes de realizar, etcétera, pero es evidente que esto no ocurre y los vehículos tienen todos los problemas comentados que el plan de mantenimiento debe considerar para evitar los costes innecesarios. Es, por tanto, evidente que las gamas deben ser variables y específicas para cada vehículo y para cada momento, en función de las operaciones correctivas realizadas (archivo histórico), de las operaciones pendientes de realizar, de las operaciones que se deriven de la inspección predictiva y de la combinación de operaciones sistemáticas que requiera. Esto supone el tratamiento de una gran cantidad de datos que, lógicamente, deben informatizarse. Los sistemas de Gestión del Mantenimiento Asistido por Ordenador (GMAO) tienen la función de planificación, control e integración del plan de mantenimiento. Los procesos más importantes que debe contemplar un sistema GMAO son los siguientes:

- *Planificación y priorización de revisiones.* Se debe planificar la entrada del vehículo a taller y priorizar por las intervenciones más relevantes.

- *Programación de las operaciones por*



Figura 3. Equipos de análisis rápidos de aceite.

SÍNTOMA	MÉTODO	VENTAJA
ALINEACIÓN DIRECCIÓN	Placa alineadora	- Valor cuantitativo
FUERZA DE FRENADO	Frenómetro	
HOLGURAS TIMONERÍA	Placa de holguras	- Rápido, sensible

Tabla 3. Ventajas e inconvenientes de los equipos de diagnóstico de los sistemas de dirección, suspensión y frenos.



Figura 4. Centro de Diagnóstico de Vehículos de la EMT de Valencia.

vehículo. En función de los factores anteriormente comentados. evitar operaciones pendientes por falta de material. Debe

- *Almacenamiento de material.*
- *Listados de informes a la carta.*

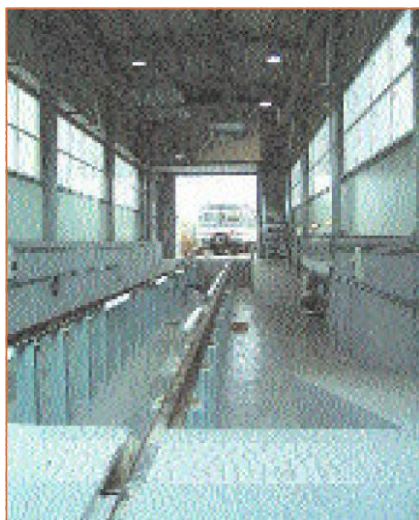


Figura 5. Centro de Diagnóstico de Automotores de Valencia.

contemplar la posibilidad de obtener la información que se requiera en cada momento.

- *Control de bonos y tiempos de trabajo.* Es necesario para organizar la carga del Taller en función de los recursos disponibles.

- *Control de los vehículos inmovilizados.* Se debe controlar para poder organizar el Servicio.

- *Diagnóstico de averías a través de un sistema experto.* Los resultados de la inspección predictiva se integran con la programación de operaciones, además deben almacenarse para posteriores análisis de tendencias e información del archivo histórico.

Estos procesos son los más usuales dentro del mantenimiento, sin embargo puede existir muchos otros que contemplen las particularidades de cada empresa y que, por tanto, son necesarios para la gestión de la misma.

El funcionamiento del sistema comienza con la planificación del vehículo para revisión en función de los criterios como el kilometraje o las horas de servicio. Una vez planificado el vehículo, el sistema prepara la inspección predictiva que le corresponde al vehículo. Se realiza la inspección y con los datos obtenidos se realiza el diagnóstico mediante un Sistema Experto que determina las operaciones complementarias. Por otra parte se determinan las operaciones previstas para el vehículo por mantenimiento preventivo sistemático, con todas las operaciones complementarias y sistemáticas se realiza una depuración

para evitar redundancias y se programan los bonos de trabajo para cada sección del taller (mecánica, eléctrica, carrocería, etc.) con las operaciones estrictamente necesarias y los materiales y herramientas indicados para cada operación. El taller realiza las operaciones, cumplimenta los bonos indicando las operaciones que han quedado pendientes y las que se han realizado adicionalmente a las propuestas. Toda esta información se realimenta en el sistema para posteriores análisis.

Para facilitar la comprensión del funcionamiento del sistema se muestra en la figura 6 un gráfico con los flujos de información de los procesos.

Gestión medio-ambiental

El tratamiento de los residuos industriales tóxicos y peligrosos en sus distintas modalidades (reciclaje, eliminación, reutilización etc.) supone un reto social y una necesidad que debe comprometernos a todos en el objetivo común de la conservación del medio ambiente.

En las empresas que se dedican al mantenimiento de flotas se producen algunos de estos residuos y es necesario un control y una gestión de los mismos para facilitar su tratamiento y

eliminación. No obstante, la tendencia natural a la solución del problema es atacar a la producción de residuos en su origen y

Figura 6. Flujos de información de un sistema GMAO. procurar la reutilización de sus materias y energía.

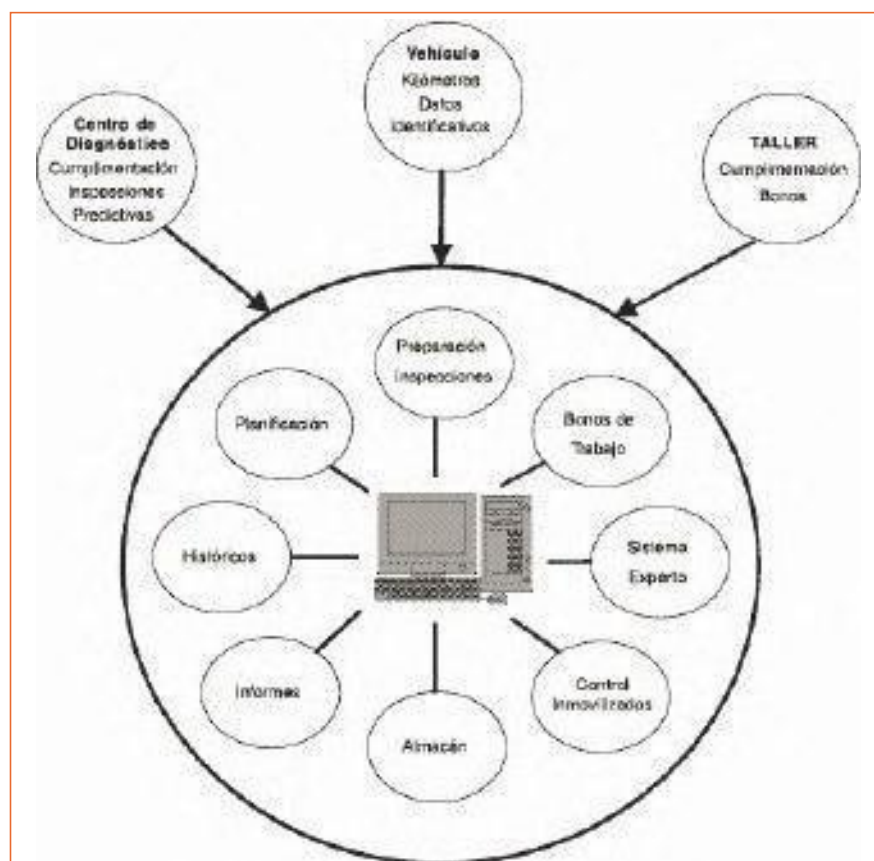
La normativa vigente especifica las responsabilidades y obligaciones en la recogida, etiquetado, almacenamiento, transporte y eliminación, siendo responsabilidad del productor la recogida, etiquetado y almacenamiento.

Para gestionar los residuos peligrosos de la empresa derivados del mantenimiento se deben seguir las siguientes pautas:

1. Identificación.
2. Recogida y etiquetado de envases.
3. Almacenamiento.

Para ello es necesario ubicar en la empresa los diversos puntos de recogida que posteriormente se trasladan al punto de almacenamiento o punto verde. La gestión de los residuos requiere un control a través de una serie de documentos que especifica la normativa y que se deben presentar al órgano competente de cada Comunidad.

Como ejemplo se muestran, en la tabla 4, los residuos peligrosos de una



empresa dedicada al mantenimiento de vehículos de transporte.

Reingeniería del plan de mantenimiento

Como se ha comentado en la introduc-

SECCIÓN	RESIDUO
MECÁNICA	Aceite usado. Se identifican aceite motor, aceite diferencial, aceite caja de cambio, aceite dirección, aceites transmisiones.
	Líquidos: refrigerantes, de frenos, valvulinas y taladrinas de amortiguadores.
	Filtros de aceite.
	Otros filtros. Filtro agua, filtro deshidratador A.A.
	Grasa bujes y otras grasas no aptas para su reutilización.
	Mantas filtrantes evaporadoras del aire acondicionado.
ELÉCTRICA	Tubos fluorescentes, lámparas de mercurio y focos.
	Baterías usadas y pilas de botón.
CARROCERÍA	Residuos pastosos de carrocería. Este residuo está formado por un conjunto de residuos que son desechados en el proceso de reparación de la carrocería.
	Filtros de cabina de pintura. Manta filtrante.
	Resinas, pinturas, lacas, barnices, esmaltes, pegamentos, jabones.
	Sustancias alquitranadas. Placas pavimento suelo vehículo.
	Neumáticos (no es tóxico y peligroso, pero su mala gestión puede causar daños medio ambientales).
	Catalizadores. Utilizados en fabricación de pintura.
	Lodos residuales de limpieza. (Se debe recoger en fosas de decantación en instalaciones).
Disolventes de pintura y desengrase.	
GENERAL	Trapos sucios. Todos los trapos que hayan mantenido contacto con alguna de las sustancias catalogadas como tóxicas y peligrosas.
	Envases de sustancias tóxicas. Se identifican envases de aceites, disolventes de pintura, disolventes de limpieza, refrigerantes, líquidos de frenos, valvulinas, taladrinas, esmaltes catalizadores de pintura y todos aquellos envases de sustancias consideradas como tóxicas y peligrosas.
	Partículas o polvos metálicos. Residuos de las operaciones de las máquinas herramienta.

transporte urbano. Jornadas Técnicas de ATUC y STEMTC. Mayo 1998.

Payri González, F.; Macián Martínez, V; Ruiz Hernández, R. *Implantación de un taller para el mantenimiento de una gran flota de transporte urbano. 7º Congreso Iberoamericano de mantenimiento*, 1993.

Monchy, F. *Teoría y práctica del mantenimiento industrial*, 1990.

AUTORES

Tabla 4. Identificación de posibles residuos tóxicos y peligrosos.

ción, el plan de mantenimiento está en constante evolución y por tanto se deben adecuar los recursos disponibles en cada momento para su optimización. La Reingeniería se ocupa de conseguir este objetivo mediante diversos métodos y herramientas como pueden ser:

- Control del gasto del mantenimiento.
- Análisis ABC de las incidencias en Servicio que permite determinar los fallos sobre los que hay que incidir en mayor medida para su eliminación.
- Seguimiento de operaciones correctivas, frecuencias, causas.
- Seguimiento de operaciones básicas de mantenimiento, rellenos de aceite, etcétera.
- Empleo de técnicas RCM.
- Análisis de síntomas anómalos.
- Realimentación de operaciones de taller, mejora del sistema experto.
- Aplicación de nuevas técnicas de diagnóstico.
- Empleo de nuevos materiales (filtros, aceites).

La combinación de todos estos métodos da lugar a continuas mejoras en el plan de mantenimiento que finalmente repercuten en la consecución de los objetivos principales del plan de mantenimiento como el aumento de la disponibilidad, seguridad, fiabilidad de los vehículos y la disminución del coste del mantenimiento.

Conclusiones

La tendencia actual en el mantenimiento de flotas de transporte, es por tanto, la integración total del plan de mantenimiento, potenciando el mantenimiento predictivo y minorando el sistemático y correctivo. La implantación de los sistemas GMAO que dispongan de módulos con sistemas expertos para el mantenimiento predictivo es un requisito indispensable para la optimización del mantenimiento. Por último, la aplicación de la Reingeniería a estos procesos produce una continua mejora del mantenimiento.

Bibliografía

Macián Martínez, V; Tormos Martínez, B; Olmeda González, P. *Fundamentos de ingeniería del mantenimiento*. SPUPV 2000.

Santiago Ballester Bauset sballes@mot.upv.es
Ingeniero técnico en Mecánica por la Universidad Politécnica de Valencia. Desde 1998 trabaja en el Centro del Mantenimiento del Transporte desarrollando la implantación, auditoría y reingeniería de planes de mantenimiento para las flotas de transporte de RENFE y EMT de Valencia.

Pablo César Olmeda González
pabolg@mot.upv.es

Bachelor of Engineering por la Universidad de Coventry (Reino Unido) e ingeniero industrial por la Universidad Politécnica de Valencia. Desde el año 1998 combina el trabajo en el Centro de Mantenimiento del Transporte (CMT), desarrollando el plan de mantenimiento integral para vehículos de tracción diesel de ferrocarril, con los estudios de tercer ciclo para la obtención del título de doctor, en la línea de mantenimiento del departamento de motores y máquinas térmicas, enfocando su investigación en el análisis de las vibraciones en motores diesel como técnica de diagnóstico no intrusiva.

Vicente Macián Martínez vmacian@mot.upv.es

Ingeniero industrial ETSII. UPV. 1981. Dr. ingeniero industrial ETSII. UPV. 1984. Catedrático de universidad ETSII. UPV. 1994. Responsable de la línea de I+D del departamento de Máquinas y Motores Térmicos de la UPV desde 1987. Director técnico de los proyectos de I+D con empresas como EMT de Valencia, Repsol YPF y MIT Renfe entre los más conocidos. Todos ellos relacionados con el mantenimiento, especialmente con el diagnóstico predictivo de averías y el desarrollo de planes de mantenimiento integrales gestionados por ordenador.

Bernardo Tormos Martínez betormos@mot.upv.es

Ingeniero industrial por la Universidad Politécnica de Valencia. Profesor titular de escuela Universitaria en la Escuela de Ingeniería Técnica Industrial de la UPV desde 1999. Miembro del departamento de Máquinas y motores térmicos desde 1995. Dentro de la línea de I+D en mantenimiento de este departamento desarrolla su trabajo en el diagnóstico de maquinaria y motores por análisis de aceite y otras técnicas aplicables al mantenimiento predictivo.

Lerma Peris, M.J.; Tormos Martínez, B. *Gestión del mantenimiento asistido por ordenador*. SPUPV 2000.

Macián Martínez, V; Martínez Puerta J.L. *Optimización del plan de mantenimiento de una flota de*



Emerald Insight

Journal of
Maintenance Quality in
Engineering



Methodology applied for maintenance technical audit in urban transport fleets

V. Macián B. Tormos J.M. Salavert S. Ballester **Article information:**

To cite this document:

V. Macián B. Tormos J.M. Salavert S. Ballester, (2010), "Methodology applied for maintenance technical audit in urban transport fleets", Journal of Quality in Maintenance Engineering, Vol. 16 Iss 1 pp. 34 - 43

Permanent link to this document: <http://dx.doi.org/10.1108/13552511011030318>

Downloaded on: 03 May 2016, At: 03:34 (PT)

References: this document contains references to 8 other documents.

To copy this document: permissions@emeraldinsight.com

The fulltext of this document has been downloaded 677 times since 2010* **Users**

who downloaded this article also downloaded:

(2013), "Maintenance performance metrics: a state-of-the-art review", Journal of Quality in Maintenance Engineering, Vol. 19 Iss 3 pp. 233-277 <http://dx.doi.org/10.1108/JQME-05-2013-0029>

(2010), "Research opportunities in maintenance of office building services systems", Journal of Quality in Maintenance Engineering, Vol. 16 Iss 1 pp. 23-33 <http://dx.doi.org/10.1108/13552511011030309>

(1995), "Total maintenance management: a systematic approach", Journal of Quality in Maintenance Engineering, Vol. 1 Iss 1 pp. 6-14 <http://dx.doi.org/10.1108/13552519510083093>

Access to this document was granted through an Emerald subscription provided by emerald-srm:573577 []

For Authors

If you would like to write for this, or any other Emerald publication, then please use our Emerald for Authors service information about how to choose which publication to write for and submission guidelines are available for all. Please visit www.emeraldinsight.com/authors for more information.

About Emerald www.emeraldinsight.com

Emerald is a global publisher linking research and practice to the benefit of society. The company manages a portfolio of more than 290 journals and over 2,350 books and book series volumes, as well as providing an extensive range of online products and additional customer resources and services.

Emerald is both COUNTER 4 and TRANSFER compliant. The organization is a partner of the Committee on Publication Ethics (COPE) and also works with Portico and the LOCKSS initiative for digital archive preservation.

*Related content and download information correct at time of download.



Methodology applied for maintenance technical audit in urban transport fleets

V. Macián, B. Tormos, J.M. Salavert and S. Ballester

CMT – Motores Térmicos, Universidad Politécnica de Valencia,
Valencia, Spain

Abstract

Purpose – The purpose of this paper is to develop a methodology for audit maintenance strategies and processes focused in urban transport fleets.

Design/methodology/approach – In response to this purpose, the main objective is to identify the strengths and the weaknesses of the maintenance system in order to establish actions that minimize the weaknesses and maximise the strengths. To audit properly, a well-structured methodology is required, in which analyses will be performed, from general to more specific plans and procedures.

Findings – It was found that the evaluation of other related aspects is also necessary. Aspects such as: facilities, personnel, computerised information systems and the accurate management of the information derived from the proper maintenance activities.

Practical implications – Using the methodology described in this paper will make it easier for the company to evaluate real maintenance performance and possible improvements.

Originality/value – By using this methodology, a detailed situation of the fleet's maintenance is illustrated, and consequently different operations can be taken into account to achieve the established improvement objectives

Keywords Maintenance, Auditing, Transport management

Paper type Technical paper

Introduction

An audit, taking into account a general definition, could be understood as a systematic review process of an activity or situation to assess the compliance with the rules and the criteria established. From this definition, two main ideas arise; the need to acknowledge the real and the desired situation of the entity to be analyzed and the need for a systematic and rigorous audit methodology that ensures its efficiency.

On the other hand, it is preferable that the audit be performed by external personnel, with experience in the topic, as they must question all aspects, without any preconceived ideas, avoiding the usual response of “because it's always been like that”, without anyone knowing the real reason. Middle management and technicians are the people who have direct contact with the daily problems and therefore, it is important to hear their comments in order to achieve a successful audit, by insuring that the image of the auditor is portrayed as being a person who offers support, solutions and improvements, and not of one who detects problems and mistakes and criticises their work (Martínez Puerta, 2002).

Once the interest and the meaning of audit have been reviewed, it is time to present our experience to the methodology used and the aspects to consider in order to efficiently evaluating the maintenance system in transport fleets.

Methodology applied

Journal of
Quality in
Maintenance
Engineering
Vol. 16 No. 1,
2010 pp. 34-43
© Emerald
Group
Publishing
Limited 1355-
2511

DOI



10.1108/13552511011030318

The methodology applied consists of several stages briefly explained.

- (1) Initial evaluation (contact with the company). In this first contact, the goals and targets have to be established. Basically these have to be the strengths and the weaknesses of the maintenance in order to improve and optimise it. A questionnaire is given out, in which general information of the company is asked, like facilities, personnel, maintenance procedures and the computerized information system. This questionnaire has to be filled in by the Maintenance Manager and returned to the auditor before scheduling new visits.
- (2) First visit to the maintenance department of the company. In this first visit, the initial questionnaire is reviewed with the Maintenance Manager or Managers, focusing on those aspects that have not been well defined or those which reflected important deficiencies. Also, future visits are scheduled and the auditor team is introduced to the maintenance technicians.
- (3) Detailed analysis of maintenance policies. In this third stage the audit takes place. As said previously, it consists of a detailed review of the different maintenance procedures; check lists, corrective, preventive and predictive. For each one of them, the strengths and the weaknesses of the real process followed by the operators need to be evaluated, including forms completed, real percentage of information introduced in the form, documentation to consult, management of all this information and the level of computerized systems. This process requires several visits and at different times, so all the garages should be visited and its working procedures analyzed, like cleaning vehicle procedures, refuelling, workshops, inventory control, etc. (Ballester et al., 2002).
- (4) Evaluation and improvement proposals. Finally, a report has to be prepared with a description of the different maintenance procedures, indicating the strengths and weaknesses. Afterwards the corrective actions have to be established in a well-prepared work plan in order to optimise the maintenance.
- (5) Control. Once the audit has finished, a follow up of the proposed actions should be performed, supervising its implementation by surveilling the appropriate indicators. Also, it is necessary to carry out, every year or two, new audits in order to obtain a continuous improvement.

Description of the methodology used to audit the maintenance in transport fleets

As stated previously in the introduction, the methodology consists of several stages that are going to be more detailed in this section.

1.1 Initial evaluation (contact with the company)

In this initial evaluation the main objective is to obtain a general view of the company and its maintenance system.

To do so, a deep questionnaire is defined and has to be filled in by the maintenance manager of the company. In this questionnaire, several aspects should be covered such as the following:

·Company data. In this section, general information of the company is asked, as well as relevant maintenance aspects like; total number of vehicles, number and models of the vehicles, facilities liable to maintenance and the number of

workshops. Also it is important to present any certification/s achieved (environmental, quality) in order to analyze the company's commitment to continuous improvement and quality.

· Organigram. The general organigram of the company as well as the maintenance department organigram has to be represented. This illustrates, first of all, the importance of the department inside the company and second, the organization 36 inside the department. It is interesting to include in this diagram the number of _____ personnel assigned to maintenance, its academic background and its experience.

- Maintenance management. Inside this section, the person or people performing the maintenance must be indicated, as well as the level of outsourcing. Also it is important to know if the maintenance activities, external and/or internal, are supervised. Finally, it must also be noted if the drivers are in charge of any check maintenance activity and if these activities are supervised.
- Maintenance facilities. Regarding the installations of the maintenance workshop, the type and the number of service pits, lubricant installations, vehicle elevators, etc ... should be known. Complementary to this information, it is necessary to know the equipment assigned to condition monitoring, such as; smoke-meter, brake control devices, engine compression measurement devices, etc. ...
- Computerized information system. The computerized information system is an important factor in maintenance and many companies do not pay enough attention to this aspect. The computerized information system used in the company must be closely analyzed, including program modules widely spread throughout the company, specially, the maintenance module or CMMS.
- Maintenance activities. In this section, the maintenance activities, in vehicles, performed by the company must be indicated, as well as all others regarding facilities or equipments where maintenance is also required.
- Corrective maintenance. In this section, the following information must be completed; who does the activity, forms used and the information collected, assistance vehicles, the follow-up done, etc. ...
- Scheduled maintenance. In this section, any maintenance plans of vehicles are shown, and if so, if the plan is defined by the vehicle's manufacturer or based on the company's own experience, or a mixture of both. Also it is necessary to know who is in charge of planning of periodical reviews, the forms used and the data collected. Finally, it is also important to know the number of redundant vehicles available in case of preventive immobilizations.
- Condition monitoring. Condition monitoring is normally performed in most companies even though many of them are not conscious of it and little importance is given to this type of maintenance. In this section, mandatory legal inspections activities must be listed describing their procedure as well as the forms and equipment used.
- Maintenance parts management. In the warehouse, the relationship with the maintenance department must be illustrated in a organigram, as well as, how the

exit of new material is registered, its relationship with repairs, the quantity of stock available, etc. ...

- Auto-evaluation. Finally in this section, the maintenance manager indicates its perceptions on aspects such as; the number of personnel available, facilities, outsourcing degree, workers formation and experience, spare parts, documentation, computerized information systems, follow-up and control of maintenance and other aspects in which improvements must be made.

Although in the survey given to the maintenance department, aspects like the cleanliness and order of the installations were not included in the evaluation, it is

important to note the degree of cleanliness throughout all the visits. This aspect is 37
extremely relevant in order to establish the importance of maintenance and the rigor _____ with
which operations are executed.

With this questionnaire a first evaluation of the maintenance situation in the company is made. A meeting with the maintenance manager and /or with the general manager is arranged to discuss and analyse the results.

1.2 First visit to the maintenance department

After the first evaluation, the strengths and weaknesses found, regarding the analyzed data, are commented on. In a following step, these will be studied more closely.

In this first visit, the maintenance manager will introduce the technicians and middle managers to the auditors. The relationship between them must be seen as a contribution to the improvement of the maintenance system and not as an assessment of personal decisions and actions.

1.3 Detailed analysis of the maintenance system

Once the initial evaluation has taken place, auditors are ready to analyze in detail each one of the maintenance procedures.

Routine maintenance activities. The analysis of routine maintenance must include the following ideas:

- The description of the process indicating who, when, how, what, where, how often it is performed, and the forms used. Within this process, activities such as vehicles refuelling, engine levels control (engine oil, cooling water, etc.) and the cleaning program of the vehicles must be taken into account.
- Management of the information regarding routine maintenance, indicating the data which are digitalized, the process of digitalization, the storage of the information and how are fluid consumptions calculated (such as engine oil or cooling water). Also, the formulas used to calculate key parameter indicators and the limits defined for fluids consumption control have to be included in this section.
- Procedure manual. If there is one, it must be analyzed and checked that the process, the key parameter indicators, the unconformity definitions and the corrective actions are correctly defined.

In our experience, these tasks are executed with less rigour than the maintenance manager is aware of. Therefore it is important to check them and may be with some night (“surprise”) visits, it is enough to detect possible deficiencies.

Corrective maintenance. The analysis of the corrective maintenance is explained in the following lines:

- Description of the process, reflecting who, when, how, what, where, how often, and the forms used. In this process all the details must be included from when the breakdown was detected (including who was the detector: vehicle driver, workshop, etc.), and the work order was launched until the moment in which this work order was closed.
 - Management of all the corrective maintenance information, listing all forms and reports used by the workshop and service management. Also, it must be listed the data used, the key parameter indicators and a control of all the corrective operations done (Gonzalez, 2004).

38

- Control of the performed repairs, indicating which are the checked points analyzed before the vehicle returns to service.

Audits or studies over repairs performed on external garages.

- Existence of failures codification, analyzing the type of codes used, and parts codification.
- Time control of operations. Verify the existence of time tariffs for corrective operations.

Follow-up of repetitive breakdowns and Pareto analysis of operations and costs.

- Procedure manual. If there is one, it must be analyzed and checked that the process, the key process indicators, the unconformity definitions and the corrective actions are correctly defined.

In corrective maintenance, it is very common to find great deficiencies in the management of the information, and no importance is given to the record of a historic vehicle information, piece or facility.

Scheduled maintenance. The analysis of scheduled maintenance must evaluate next items presented in the following lines:

- Description of the process indicating who, when, how, what, where, how often it is performed, and the forms used. In this process, it must be included how the planned immobilization of the vehicle is performed, and the operations scheduled to be done.
- Management of all the scheduled maintenance information generated, listing all forms and reports used. The data used, the follow-up key process indicators and a control of all the preventive operations done, must also be listed.
- Maintenance plans definition: focusing on the oil drain periods, how these periods has been defined and the results obtained from the oil analysis program and its management.
- Seasonal maintenance (if exists), indicating the different seasons, their controls and follow-ups as well as the relationship with other operations.

- Time controls of predictive work, indicating the existence of time tariffs depending on the operation performed.
- Engine oil and parts quality. Analyze the different qualities available for the appropriate usage, and analyse if a follow-up of this quality is made based on characteristics such as: supplier, brand, so on.
- Existence of operations' codification, analyzing the type of codes used, the codification of parts and the existing actions.
- Differentiation of the operations encountered per sections; mechanical, electrical, etc. ...
- Relationship and hierarchy between the preventive and the corrective operations for its scheduling.

Treatment of the critical preventive operations that cannot be delayed.

- Control of the kilometres covered (real or estimation) in order to be able to schedule.
- Definition and follow-up of interchangeable groups (parts that can be used in different vehicles during its life).

Management of the "not-finished" operations, indicating how are controlled.

39

- Procedure manual. If there is one, it must be analyzed and checked that the _____ process, the key process indicators, the unconformity definitions and the corrective actions are correctly defined.

Due to our experience, it is usual to find maintenance plans with inappropriate operations or periods. Due to the experience of the workshops, the operations and procedures are done correctly, but these changes are not reflected in the maintenance plan, causing a lack of reliability towards the information that appears in the maintenance plans.

Condition monitoring. The condition monitoring analysis must cover the following aspects:

- Description of the process indicating who, when, how, what, where, how often the inspections are performed, and the paper forms used. Within this process, how the inspections are scheduled, the types of inspections and the periods, must be included.
- Information management of the condition monitoring indicating all the paper forms and reports used and symptoms reviewed.

Equipment available to do the inspections.

Definition of critical symptoms that have to be checked after being repaired.

- Procedure manual. If there is one, it must be analyzed and checked that the process, the evaluation, the diagnosis of the symptoms, the indicators, the unconformity definitions and the corrective actions are correctly defined.

Condition monitoring is normally done in most companies even-though many of them are not conscious of it and little importance is given to this type of maintenance (Macia'n et al., 2000). It is usual that some legal mandatory activities (examples such as: brakes, engine emissions or wheel angles inspection) are performed but with little importance even in the maintenance plan.

Computer-managed maintenance system (CMMS). The information management system is, without a doubt, a key element of a good maintenance management (Cato and Mobley, 2002). All of the previous paragraphs have talked about its importance and therefore it is necessary to review closely the software being used:

- Available number of modules.
 - Integration of the different types of maintenance.
 - Proper and external resources management.
 - Inventory control
 - Cost management with the possibility of grouping them by different parameters such as: vehicle, type of maintenance, materials, service, workshop, etc. ...
 - Document management.
 - Integration (or interface) with other software applications used.
 - Scheduling of services and inspections.
 - Work order management.
 - Diagnosis methodology (alert and alarm levels for out-of-tolerance condition, expert systems for diagnosis, etc.).
 - A follow-up of interchangeable groups.
- 40 · Types of queries, reports, indicators and their configuration possibilities.

Even though this type of commercial software covers a wide range of needs, in most cases it has not been designed to manage the special features of a transport fleet (Lerma and Tormos, 2000).

1.4 Evaluation and improvement proposals

With this detailed analysis, auditors are able to report to the company all the strengths and weaknesses found in order to maximise or minimise them respectively by designing improvement proposals.

It may seem obvious, but the improvement proposals cannot be universal because each company has its own procedures, philosophy and specific resources. Therefore these proposals must be adapted to the company's strategies, objectives and limitations (Macián et al., 2004).

In order to create an improvement plan, the weaknesses, the strengths, the conditionings and the limitations of the company must be taken into account, by applying the well-known SWOT matrix procedure to the maintenance tasks and its environment. This procedure allows the visualization of the relationship between the weaknesses and the strengths, as well as, the environmental factors affecting maintenance in the company (opportunities and threats).

As said previously, the CCMS being used will determine the ability to accomplish the established improvement proposals. At the moment when the improvements are achieved throughout the rest of the maintenance system, this will be reflected rapidly in the company's key indicators.

Therefore, to create an appropriate improvement plan, a SWOT analysis must be done. Figure 1 represents the SWOT analysis for a weak point encountered: “condition monitoring program not developed”.

In the previous example, a general SWOT matrix was presented for one weak point capable of breaking down into several others. This means that several SWOT analyzes can be done from one weak point.

Finally, in order to establish an improvement plan and its corresponding actions, it is necessary to take into consideration several aspects such as:

- Resources needed (personnel, material, etc.). When fewer resources are needed, the easier its implementation.
- Predisposition of the personnel in charge of implementing the new changes. It is crucial that the personnel are convinced of the necessity to introduce the new changes; an important part of the exit will depend on them.
- Easy implementation. Sometimes a simple remodelling or a creation of a new paper form is sufficient to achieve a significant improvement.
- Speed in obtaining results. It is necessary to start with the operations that can achieve results in the shortest period of time possible. These actions can be used as a motivational tool for the personnel and also to justify its necessity.

<p>WEAKNESSES</p> <ul style="list-style-type: none"> • The condition monitoring program doesn't have a proper identity. • Not enough available equipment. • A specific area doesn't exist. • Specific forms don't exist. 	<p>THREATS</p> <ul style="list-style-type: none"> • It is necessary to invest economically in order to maximise it.
<p>STRENGTHS</p> <ul style="list-style-type: none"> • The personnel are conscious of the necessities in order to reduce breakdowns. • Inspections, namely differently, of some systems are being done. • Oil samples are sampled and analyzed. • Legal mandatory inspections are done. 	<p>OPORTUNITIES</p> <ul style="list-style-type: none"> • The management is conscious of the need and are willing to invest in order to maximise it.
<p>CONCLUSION: In order to establish an improvement plan, it is necessary to start with small improvements, which don't require investing big amounts of economic resources . For instance, creating forms and performing inspections with the available equipment. In the next stages new improvements can be accomplished, like the acquisition of new equipment and establishing specific working areas.</p>	

Figure 1.
Example of a SWOT
analysis

1.5 Control and follow-up of
the maintenance system and
the improvements

In

order to evaluate the success or failure of the implemented improvements, a control and a follow-up of them must be established (Ministerio de Fomento, 2005). This is done through the study of the evolution of the indicators involved in the procedure. In case there were not enough indicators involved, more should be created during the improvement plan configuration.

The following aspects must be taken into account as general recommendations regarding the creation of new indicators:

- Creation of few new indicators at a time.
- Clear, useful and quick to obtain.
- Informative at different levels: strategic and operative.
- Easy to determine control limits.

And also the indicators must be able to:

- Acknowledge the state of the procedure.
- The definition of “unconformity”.
- Decision making.

Finally, for the control of the maintenance process, it is necessary to establish the management scheme with maintenance indicators, at the strategic and operative level.

As it appears in Figure 2, the control and follow-up must feedback the system by means of “unconformity detection”. They are analyzed and new actions are established in order to improve them, creating a continuous improvement system.

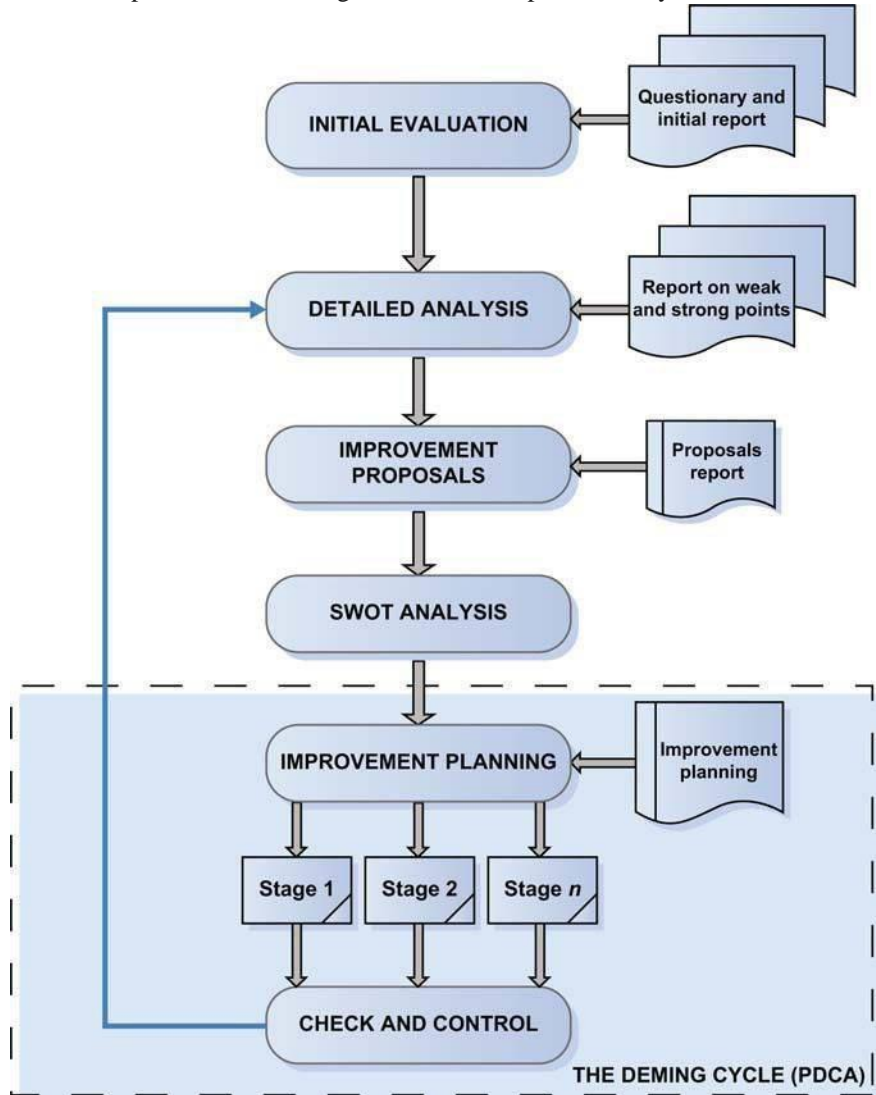


Figure 2.
Diagram of the
methodology defined for
maintenance audit

Figure 2 illustrates the maintenance audit methodology, described previously, showing all the different stages.

Conclusions

To achieve with success a maintenance system audit in transport fleets, a well-designed methodology, based on experience, must be followed. This experience

will contribute to detect the weaknesses and the strengths of the maintenance

43

activities, to understand the possible problems that arise as the process completes each stage and finally to plan an improvement strategy throughout achievable goals.

References

- Ballester, S., Olmeda, P., Macián, V. and Tormos, B. (2002), "El mantenimiento de las flotas de transporte", *Técnica Industrial*, Vol. 247, pp. 42-7.
- Cato, W.W. and Mobley, R.K. (2002), *Computer-Managed Maintenance Systems*, Butterworth-Heinemann, Boston, MA.
- Gonzalez, F.J. (2004), *Auditoria del mantenimiento e indicadores de gestión*, Fundación Confemetal, Madrid.
- Lerma, M.J. and Tormos, B. (2000), *Gestión del Mantenimiento Asistida Por Ordenador*, Servicio de Publicaciones de la UPV, Valencia.
- Macián, V., Tormos, B. and Olmeda, P. (2000), *Fundamentos de Ingeniería del Mantenimiento*, Servicio de Publicaciones de la UPV, Valencia.
- Macián, V., Tormos, B., Lerma, M.J. and Ballester, S. (2004), "Gestión de la Información para la Reingeniería del Mantenimiento", *Mantenimiento*, Vol. 177, pp. 35-41.
- Martínez Puerta, J.L. (2002), "Sistema de gestión del mantenimiento para una flota de autobuses de transporte urbano", *Jornadas sobre el mantenimiento en el sector del transporte y la logística*, 1st ed., Asociación Española del Mantenimiento, Madrid.
- Ministerio de Fomento (2005), *La gestión por procesos. Elaboración de un análisis DAFO en organizaciones de Transportes, Anexo IV. A3*, available at: <http://www.fomento.es/NR/rdonlyres/286FB432-2D3C-4596-94B3-1B2D96AF526D/19424/IVA3.pdf>

Corresponding author

B. Tormos can be contacted at: betormos@mot.upv.es

JQME
16,1

To purchase reprints of this article please e-mail: reprints@emeraldinsight.com Or visit our web site for further details: www.emeraldinsight.com/reprints

Diagnóstico de la condición de desgaste basado en el análisis de aceite usado. Caso de estudio: Vehículo de servicio de taxi



Wear diagnosis based on the oil analysis. A case study: Public taxi service

Segundo Narciso Cabascango Collahuazo.¹, Jaime Fernando Antamba Guasgua.², Luis Fabricio Corrales Zurita.³ & José Israel Guerra Naranjo.⁴

Recibido: 02-06-2020 / Revisado: 13-06-2020 / Aceptado: 04-07-2020/ Publicado: 04-08-2020

Abstract. DOI: <https://doi.org/10.33262/concienciadigital.v3i3.2.1399> The operating conditions of a vehicle engine depend on the fuel, lubricant and components; thus the diagnosis is made directly by continuous monitoring of the lubricant. This project evaluates the condition of engine wear due to ignition caused in a taxi-type public use vehicle, applying the used lubricant analysis technique. The research process is experimental, a baseline of the lubricant and vehicle is raised, for the sampling of every 4000 kilometers of route, in each sample the physical and chemical properties of the lubricant are analyzed, the behavior is established of the viscosity, contaminating particles and metallic particles of the vehicle's SI. The behavior of the PQ index shows a constant tendency for wear, the size of the iron particles are small, the PQ index combined with a low ppm of iron indicates a common wear, and low incidence of abrasive wear on the moving parts of the engine for environment pollution.

Keywords: oils, maintenance engineering, tribology, transportation.

Resumen.

¹ Universidad Internacional del Ecuador, Escuela de Ingeniería Automotriz, Quito, Ecuador, nacabascangoco@uide.edu.ec

² Universidad Internacional del Ecuador, Facultad de Ciencias Técnicas, Quito, Ecuador. jferantamba@gmail.com

³ Universidad Internacional del Ecuador, Escuela de Ingeniería Automotriz, Quito, Ecuador. lucorraleszu@uide.edu.ec

⁴ Instituto Superior Tecnológico Tecnoecuatoriano, Carrera de Tecnología Automotriz, Quito, Ecuador. iguerra@tecnoecuatoriano.edu.ec

Las condiciones operativas del motor de un vehículo dependen del combustible, lubricante y los componentes, para ello se plantea el diagnóstico directamente por un monitoreo continuo del lubricante. Este proyecto evalúa la condición de desgaste del motor por encendido provocado en un vehículo de uso público tipo taxi, aplicando la técnica de análisis de lubricante usado. El proceso de investigación es experimental, se levanta una línea base del lubricante y vehículo, para la toma de muestras cada 4000 kilómetros de recorrido, en cada muestra se analiza las propiedades físicas y químicas del lubricante, se establece el comportamiento de la viscosidad, partículas contaminantes y partículas metálicas del MEP del vehículo. El comportamiento del índice PQ y partículas metálicas, muestra una tendencia constante para el desgaste, el índice PQ combinado con un bajo número ppm de hierro indica una tendencia de desgaste normal, también, se descarta la contaminación por el ambiente que rodea el funcionamiento del MEP, indicativo de una incidencia leve para desgaste abrasivo en las piezas móviles del motor.

Palabras claves: aceites lubricantes, ingeniería de mantenimiento, tribología, transporte.

Introducción.

El transporte público constituye una alternativa importante al transporte individual, sobre todo en ciudades con alto flujo de vehículos particulares. Argumentos a favor del uso del transporte público con frecuencia se centran en el costo, la disponibilidad y el impacto ambiental (Macián V. , Tormos, Miró, & Pérez, 2016). Las empresas transportistas de servicio público, tienen un interés evidente en monitorear su desempeño para reducir los costos y aumentar la disponibilidad.

El diagnóstico de la condición del motor de encendido provocado (MEP) utilizando las técnicas del análisis del lubricante usado, identifica la problemática del desgaste, favoreciendo la aplicación del mantenimiento preventivo en los vehículos nacionales, la disminución de las actividades de mantenimiento correctivo, brinda mayor confiabilidad acerca del estado real del motor y sus consecuencias en la funcionalidad del vehículo (Antamba, 2018) (Macián V. , Tormos, Olmeda, & Montoro, 2003).

En los motores de combustión interna, donde el combustible es quemado, la lubricación se afecta por los fenómenos de la combustión, generadas por las altas temperaturas, productos de la combustión y residuos que contamina el lubricante y los esfuerzos sometidos (Tormos, B., 2006) (Adams, 2010), por ello, las condiciones operativas del motor de un vehículo, dependen del combustible, lubricante y los componentes, para ello se plantea el diagnóstico con base a escenarios relacionados directamente al monitoreo continuo del lubricante basados en los parámetros y elementos medibles en una muestra de aceites, según estándares internacionales (Bovington, 2019). La norma ISO 17359, establece las directrices para los

procedimientos generales que se deben considerar al establecer un programa de monitorización de condición para cualquier tipo de máquina (Fernández-Feal, FernándezFeal, Sánchez-Fernández, & Pérez-Prado, 2018).

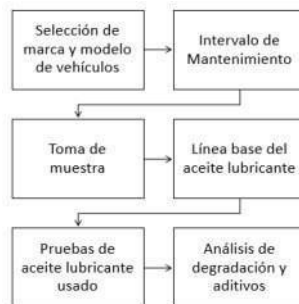
En la ciudad de Quito, el servicio público de taxis, constituye un eje de movilidad. Acorde al Plan Maestro de Movilidad de Quito 2009-2025, constituye un medio de transporte, tanto para la población local y visitantes extranjeros dentro y fuera de la ciudad. El estudio de oferta y demanda de taxis en el DMQ muestra que existe un universo de 29347 vehículos que ofrecen este servicio, de los cuales 16024 (54,6%) son taxis formales y 13323 (45,4%) son informales. Este servicio tiene una demanda de 42000 usuarios y en promedio se realizan 226.000 viajes diarios. Así mismo, tomando en cuenta la población de 2500000 habitantes en Quito, hay un promedio de posibles usuarios de 163 por taxi (Instituto de la Ciudad, 2017). Con base a la información recolectada es importante mejorar la disponibilidad y la reducción del impacto ambiental de este servicio público.

Este proyecto, se orienta en evaluar la condición de desgaste del motor por encendido provocado en un vehículo, aplicando la técnica de análisis de lubricante usado, para la recolección de la información, en un vehículo tipo M1, de uso público tipo taxi, correspondiente a la marca Chevrolet, la más representativa en el país, según la AEADE.

Metodología.

El proceso metodológico se divide en dos etapas: La primera etapa establece la línea base del vehículo de prueba a través del mantenimiento preventivo del vehículo y la medición de gases para la verificación del cumplimiento de la normativa RTE INEN 2204. La segunda etapa corresponde a los procesos de medición y recolección de datos en las muestras de aceites, basados en las normas ASTM de los parámetros de propiedades físicas químicas de los lubricantes. La metodología empleada en este estudio es similar a estudios vinculados desarrollados por Raposo, Saldivia y Tormos aplicable en diferentes tipos de motores de combustión interna. El proceso de investigación experimental se desarrolló, como se muestra en la figura 1.

Figura 1. Etapas del proceso investigativo experimental.



Fuente: Elaboración propia.

El proceso de investigación vinculado al desgaste del motor y las mejoras en beneficio del medio ambiente se desarrolló, en la ciudad de Quito, ubicada en una zona geográfica de elevación promedio de 2800 metros sobre el nivel del mar.

Vehículo.

Dentro del segmento de automóviles los vehículos más vendidos son el Chevrolet Sail y Aveo Family, siendo estos modelos, parte del segmento de taxis que circulan en la ciudad de Quito (AEADE, 2018). Una selección apropiada constituye elegir una muestra estratificada, categorizada por años de servicio. Para el desarrollo del proyecto se eligió un vehículo Chevrolet Aveo año 2012, de recorrido en kilometraje de aproximadamente 200000 km, el cual se observa en la figura 2.

Figura 2. Vehículo de prueba, tipo taxi



Fuente: Elaboración propia.

Los parámetros analizados en el vehículo elegido están dados por el kilometraje superior a 200000 kilómetros, aceite lubricante base mineral, común para los vehículos tipo taxi, combustible gasolina tipo Extra y tiempo de trabajo mínimo de 8 horas al día. En la tabla 1, se describe las características del vehículo de prueba.

Tabla 1. Vehículo de prueba

Característica	
Marca	Chevrolet
Modelo	Aveo Family
Motor	4 en línea
Cilindraje	1,5 litros
Combustible	Gasolina Extra
Kilometraje	201000 km

Fuente: Elaboración propia.

Pruebas para muestras de aceite

El análisis del aceite usado de las muestras obtenidas de los MEP del vehículo de pruebas se efectúa en los laboratorios Tribologik (Canadá) bajo la acreditación ISO 17025, por parte del Organismo de Acreditación Ecuatoriano con el código: OAE LE C 10-014. El paquete de análisis de metales y tribología se detalla en la tabla 2.

Tabla 2. Pruebas de análisis de metales y tribología

Prueba	Parámetro determinado	Unidades	Método
Espectrometría ICP	Máximo 22 elementos metálicos y no metálicos	ppm	ASTM D-5185
Espectrometría IR	Calidad y contaminación del lubricante	N/A	JOAP
Contaminación	Agua por Karl Fischer	Ppm	ASTM D-4928
Propiedad química	TBN	mg KOH/g	ASTM D-2896
Conteo de partículas	Partículas > 1µm	Índice de limpieza	ISO 4406

Fuente: Elaboración propia.

La muestra de aceite usado, se obtiene cada 4000 km, en un periodo de seguimiento de 20000 km, considerando los procedimientos recomendados para la toma de muestra.

Lubricante de prueba

Para el estudio, se referencia el lubricante del vehículo de prueba, estableciendo la línea base del lubricante, es decir, se determinan las propiedades físicas y químicas del aceite mineral SAE 20W-50, como se muestra en la tabla 3.

Tabla 3. Propiedades de aceite (muestra virgen)

Identificación	20W-50
Elementos	
Fe-Hierro	1
Al-Aluminio	2,2
Mo- Molibdeno	12
Ti-Titanio	66
Si-Silicio	4
Mg-Magnesio	8
B-Boro	115
Na-Sodio	-

Ca-Calcio	1947
P-Fosforo	812
Zn-Zinc	975
Propiedades	
Viscosidad	20,4
TBN	7,72

Fuente: Elaboración propia.

Viscosidad relativa.

La viscosidad relativa (Tormos, 2006), definida por la ecuación 1, establece los datos de viscosidad del lubricante nuevo y el lubricante usado, permite la evaluar la variación de viscosidad independientemente del recorrido del vehículo, según los resultados medidos, para cada medición.

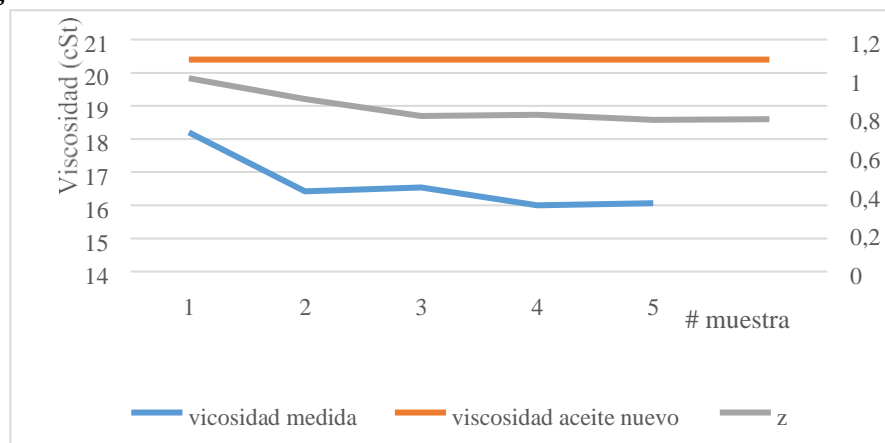
$$Z_{visc} = \frac{\text{Viscosidad medida}}{\text{Viscosidad referencial}} \quad [1]$$

Resultados.

Salud del lubricante.

El parámetro esencial de la salud del lubricante es la viscosidad. Para la comparación apropiada se utiliza la viscosidad relativa. En la figura 3, se muestra la variación de la viscosidad medida y la viscosidad relativa (z).

Figura 3. Variación de viscosidad del aceite SAE 20W-50.



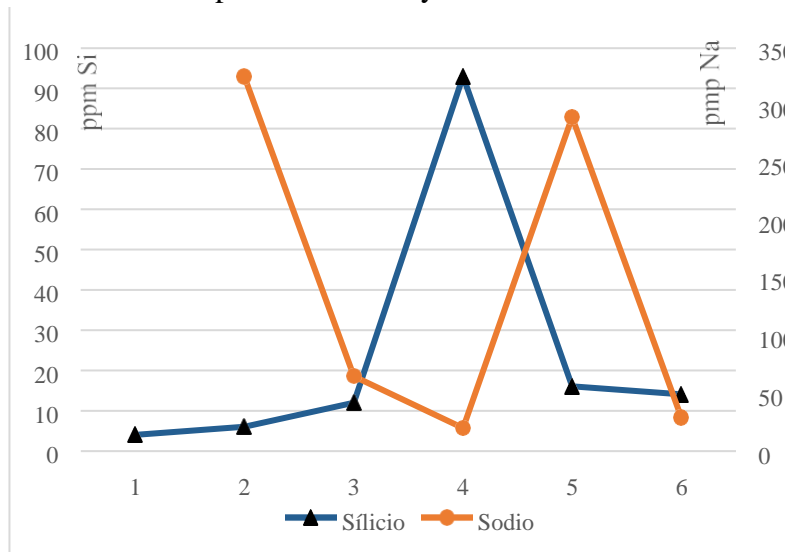
Fuente: Elaboración propia.

En la evaluación de la viscosidad, se observa una degradación similar en cada periodo de cambio, con variación máxima del 3,1 % entre los resultados y una reducción de viscosidad máxima del 22%. La condición del aceite para el intervalo de cambio establecido opera en condiciones apropiadas cercanas al límite permisible.

Desgaste vinculado al aire atmosférico.

La evolución de las concentraciones por partículas contaminantes se muestra en la figura 4., el valor promedio de Silicio es de 28,2 ppm y el sodio de 83,2 ppm, los valores son superiores al estado inicial del lubricante. El sodio es un contaminante que existe en el combustible como un componente natural del crudo, normalmente en concentraciones por debajo de 50 ppm.

Figura 4. Variación de partículas de Si y Na en el aceite SAE 20W-50



Fuente: Elaboración propia.

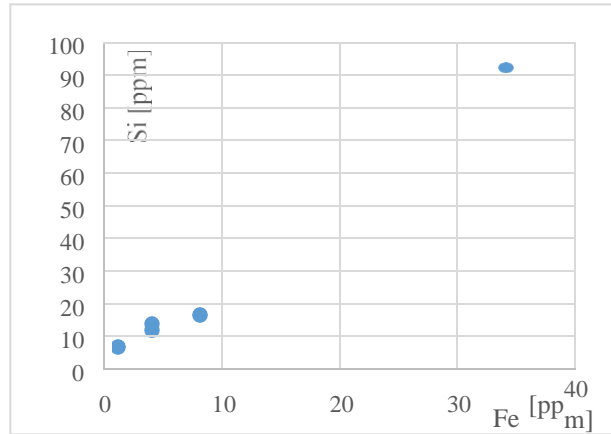
En el caso del silicio se observa una medición seis veces superior al valor límite en la tercera medición, el resto de las mediciones se encuentran dentro de los límites permisibles y críticos. En el caso del sodio, ninguna medición supera el valor crítico y la medición correspondiente en la primera medición y cuarta medición, superan el valor permisible, ya que no existe coincidencia de partículas contaminantes altas.

En este caso, el silicio se vincula con las partículas que ingresan por el aire para la combustión, por ello, se puede descartar una incidencia de desgaste abrasivo, por presencia de partículas contaminantes del aire atmosférico.

Partículas de desgaste.

El comportamiento de las partículas metálicas de hierro, relacionados a elementos tales como el bloque motor, válvulas y otros elementos, con respecto al silicio, se muestran en la figura 5, para el vehículo de prueba.

Figura 5. Relación entre las partículas de Si –Fe para MEP.

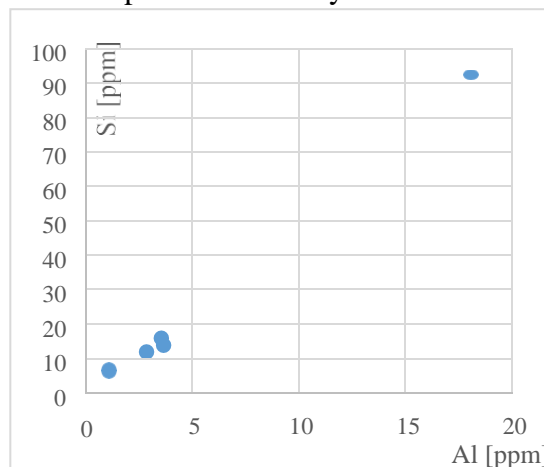


Fuente: Elaboración propia.

En el caso de las partículas de hierro, se observa que la contaminación ambiental no tiene incidencia en la presencia de una mayor cantidad de partículas de hierro, en las muestras obtenidas.

En la figura 6, se observa la relación entre el aluminio y el silicio, en ambos casos, existen mínimas partículas relacionadas a los componentes del motor.

Figura 6. Relación de las partículas de Si y Al

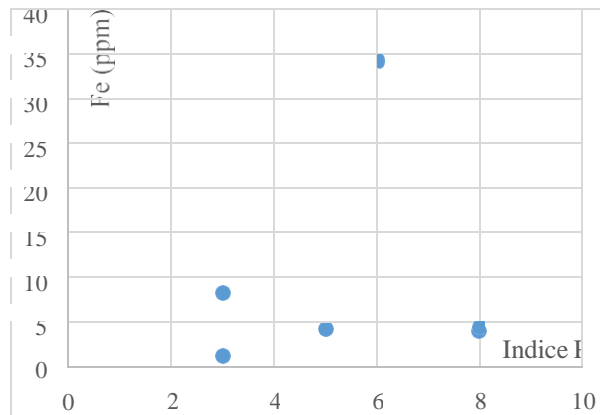


Fuente: Elaboración propia.

En las muestras analizadas, se obtiene valores de 1 a 4 ppm de Aluminio, y un valor atípico de 18 ppm de Aluminio, con base a los resultados no existe una tendencia de desgaste abrasivo producto del trabajo de los elementos del motor.

En la figura 7, se muestra el comportamiento del indicador PQ con respecto a las partículas del hierro.

Figura 7. Relación de las partículas de Fe y el índice PQ.



Fuente: Elaboración propia.

El comportamiento del índice PQ, muestra una tendencia constante, el tamaño de las partículas de hierro son pequeñas, analizándose el índice PQ y el un bajo ppm de hierro, indican una tendencia de desgaste normal. En términos generales no existen partículas grandes de hierro generados por algún tipo de desgaste.

Conclusiones.

- La línea base del estudio, se ha establecido para facilitar la fijación de los límites de las diferentes propiedades medidas, lo que permite la comparación de los cambios presentes en el lubricante, además facilita el cálculo de la variabilidad de las partículas de desgaste y viscosidad.
- Las herramientas aplicadas permiten analizar las propiedades y partículas del aceite usado, la viscosidad del aceite se ve reducida en un 22%, por ello, no se debe exceder el límite de cambio de aceite, en vehículos de este tipo de uso.
- De acuerdo, al análisis del silicio y sodio con relación a las partículas de hierro, se descarta la contaminación por el ambiente que rodea el funcionamiento del MEP y la incidencia en un desgaste abrasivo para las piezas móviles del motor.
- Dado el comportamiento del índice PQ y las partículas de hierro medidas, se establece una tendencia de desgaste normal, para el MEP del vehículo de prueba.
- Se requiere ampliar el plazo de seguimiento para recopilar información que confirmen los datos obtenidos.

Referencias bibliográficas.

- Adams, D. R. (2010). Tribological considerations in internal combustion engines. En *Tribology and Dynamics of Engine and Powertrain* (págs. 251-283). London: Woodhead Publishing.
- AEADE. (2018). Anuario 2018. Quito.
- Antamba, J. F. (2018). Diagnóstico de la condición operativa del motor por encendido provocado (MEP), según el tipo de gasolina empleado en las ciudades de Quito y Esmeraldas. Quito: Tesis posgrado EPN.
- Bovington, C. (2019). *Friction wear and the role of additives*. UK: Springer.
- Distrito Metropolitano de Quito. (2009). Plan Maestro de Movilidad de Quito 2009-2025.
- Fernández-Feal, M. C., Fernández-Feal, M. L., Sánchez-Fernández, L. R., & Pérez-Prado, J. R. (2018). Study of Metal Concentration in Lubricating Oil with Predictive Purposes. *Current Journal of Applied Science and Technology*, 27(6), 1-12.
- Instituto de la Ciudad. (2017). El DMQ-y-la-dinamica-de-un-servicio-de-taxi-que-evolucionaria. Obtenido de <https://www.institutodelaciudad.com.ec/coyuntura-sicoms/169-eldmq-y-ladinamica-de-un-servicio-de-taxi-que-evolucionaria.html>
- Macián, V., Tormos, B., Miró, G., & Pérez, T. (2016). Assessment of low-viscosity oil performance and degradation in a heavy duty engine real-world fleet test. *Proc IMechE Part J: J. Eng. Tribol.*, 230(6), 729-740.
- Macián, V., Tormos, B., Olmeda, P., & Montoro, L. (2003). Analytical approach to wear rate determination for internal combustion engine condition monitoring based on oil analysis. *Tribology International*, 36.
- Raposo, H., Torres Farinha, J., Fonseca, I., & Galar, D. (2019). Predicting condition based on oil analysis – A case study. *Tribology International*, 135, 65-74.
- Saldivia, F. (2013). Aplicación de mantenimiento predictivo. Caso Estudio: análisis de aceite usado en un motor de combustión interna. Obtenido de XI Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology (LACCEI'2013): <http://www.laccei.org/LACCEI2013Cancun/RefereedPapers/RP264.pdf>.
- Tormos, B. (2013). Diagnóstico de motores diésel mediante el análisis del aceite usado. . España: Reverte.

PARA CITAR EL ARTÍCULO INDEXADO.

Cabascango Collahuazo, S. N., Antamba Guasgua, J. F., Corrales Zurita, L. F., & Guerra Naranjo, J. I. (2020). Diagnóstico de la condición de desgaste basado en el análisis de aceite usado. Caso de estudio: Vehículo de servicio de taxi. *ConcienciaDigital*, 3(3.2), 18-28. <https://doi.org/10.33262/concienciadigital.v3i3.2.1399>



El artículo que se publica es de exclusiva responsabilidad de los autores y no necesariamente reflejan el pensamiento de la **Revista Conciencia Digital**.

El artículo queda en propiedad de la revista y, por tanto, su publicación parcial y/o total en otro medio tiene que ser autorizado por el director de la **Revista Conciencia Digital**.



Assessment of low-viscosity oil performance and degradation in a heavy duty engine real-world fleet test

2016, Vol. 230(6) 729–743
! IMechE 2015
Reprints and permissions:
sagepub.co.uk/journalsPermissions.nav
DOI: 10.1177/1350650115619612
pij.sagepub.com



Original Article

Proc IMechE Part J:
J Engineering Tribology

Vicente Macian¹, Bernardo Tormos¹, Guillermo Miro¹ and Toma's Pe'rez²

Abstract

Low-viscosity engine oils (LVO) are considered as one of the most interesting solutions for improving fuel economy in internal combustion engines (ICE). There are different studies involving LVO and ICE, but currently limited data are available regarding “real-world” performance of LVO in a real service fleet. Included in a broadest study related with fuel consumption saving effects and performance of LVO in a real service fleet, the aim of this work is to present the results obtained in terms of comparative oil performance. So, on this test, a comparative analysis using 39 buses was performed, based on a deep and extensive oil analysis program to assess those aspects above mentioned. Two engine technologies (diesel and CNG) were considered and four different lubricants, two of them LVO and other two used as a reference baseline. The test duration comprised two oil drain intervals of 30,000 km each one, totalizing more than 2 million of kilometers accumulated. Results have shown that LVO presented an excellent performance along the oil drain interval (ODI), even improving some characteristics of the baseline oils with higher viscosity values. Results have shown that oil degradation is more dependent on engine technology, but in any case presented a penalization in terms of ODI reduction, a key indicator for end-users related with maintenance costs. In the case of CNG engines, higher oil degradation in terms of oil oxidation and nitration was observed.

Keywords

Low-viscosity oils, oil degradation, fuel economy, fleet test, oil condition monitoring

Date received: 16 July 2015; accepted: 16 October 2015

Introduction

In recent years, an increasing concern about the environment and environmental health has been growing in the developed world. Being one of the main sources of pollutant emissions worldwide, internal combustion engine (ICE)-powered vehicles have adopted a consistent trend of reduction of different emission types, spurred by government's legislation or Original Equipment Manufacturer's (OEM) initiatives. Furthermore, the regular evolution of fuel prices is always translated in a public interest for reducing fuel consumption of ICE, also related to emissions reduction.

Thus, a wide number of alternative options have appeared to improve ICE fuel economy: on one hand,

improvements of different automobile systems (regenerative braking, start-stop, aerodynamics, etc.) and, on the other hand, significant improvements in terms of engine efficiency, focused on two different points of view: thermo-chemical processes involved in combustion and mechanical efficiency. Unfortunately, no singular contribution can reach final targets of fuel economy expected in a close future and, obviously, an optimum combination of several alternatives will be required. In order to decide which one can be part of the solution, a previous analysis in terms of potential benefits versus implementation cost must be done. One of the solutions that presents a better ratio in terms of benefit versus implementation cost is the use of low-viscosity oils (LVOs),¹ which directly affect in engine mechanical efficiency. It can be clearly noticed that the automotive industry has strongly bet for reducing the viscosity of oil; OEM's recommendations have shown a net reduction in Society of Automotive Engineers (SAE) J300 grades for

¹ CMT-Motores Te'rmicos, Universitat Politè'cnica de Vale'ncia, Spain

² CTR-Repsol, Mo'stoles, Spain

Corresponding author:

Guillermo Miro', CMT-Motores Te'rmicos, Universitat Politè'cnica de Vale'ncia, Cami' de Vera, s/n, 46022, Vale'ncia, Spain. Email: guimimez@mot.upv.es

service-fill oils.² Obviously, this situation has been accomplished by higher quality formulations, both improving base oils (including the evolution of base oils from API G-I to API G-III and G-IV) as well as the use of novel additives (partially obliged by the evolution of post-treatment technologies for some engines and stringent emission requirements).³

The basic physics of the application of LVO is based on the reduction of the thickness of the layer of lubricating oil which separates two surfaces in relative motion, according to the fundamentals of hydrodynamic lubrication. The fluid viscosity, the load carried by the two surfaces and the relative speed combine to determine the thickness of the fluid film. This in turn determines the lubrication regime.⁴ There are established four different lubrication regimes:

Hydrodynamic lubrication—two surfaces are separated by a fluid film.

Elastohydrodynamic lubrication—fluid-film lubrication in which hydrodynamic action is significantly enhanced by surface elastic deformation and lubricant viscosity increases due to high pressure.⁵ Mixed lubrication—two surfaces are partly separated, partly in contact.

Boundary lubrication—two surfaces are mostly in contact with each other even though a fluid is present.

How these factors all affect the friction losses and how they correspond to the different regimes is shown on the Stribeck curve,⁶ in Figure 1.

Thus, the viscosity reduction has a very clear objective, diminishing viscous friction losses, but at the same time can lead to a undesired consequences: changing the lubrication regime and therefore modifying lubricant's condition and performance.⁷

Clearly in the quest for lubricant-derived fuel economy, it is essential to balance the need for reduced fuel

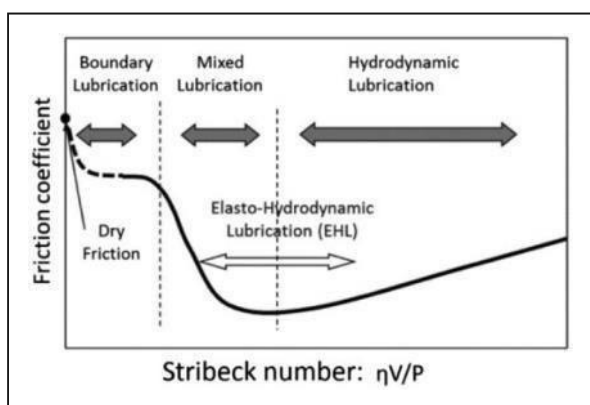


Figure 1. Stribeck curve and lubrication regimes associated.

consumption with the need to meet the most challenging OEM and industry specifications to maintain excellent engine durability.⁸ Also, there is an interest of fleet operators and OEM's to extend oil drain intervals (ODI) without compromising engine future condition.⁹ This performance can decisively influence engine life, because it can promote wear and other negative effects.

Thereby, in recent years different tests have been performed with engine oils with improved bases and additive packages in order to validate fuel economy and derived effects. There are different researches carried out in test rig^{8,10-12} and in real fleet.^{13,14} Engine wear and the most affected areas have also been measured in some test,^{15,16} but there are no studies on the performance of these LVO and their inherent properties variations throughout the oil drain interval.

The work presented in this paper is just a portion of a broader study, in order to verify and quantify fuel economy and potential derived effects of these LVOs in real-world conditions. Results obtained in terms of fuel economy presented clear benefit at all levels.¹⁷

Degradation related to low-viscosity oils

The implementation of new technologies to reduce emissions, such as the use of pilot injection or exhaust gas recirculation (EGR) have led to the emergence of new challenges to be met by the lubricant.¹⁸⁻²⁰ Also, the advancement of engine technology through downsizing and the introduction of new combustion strategies present a challenging environment for the engine oil. Not only do these hardware changes mean increased specific power density and higher lubricant temperatures, but also reduced lubricant volumes, representing that the lubricant resides in the piston zone for longer times and is exposed to combustion products at higher temperatures. All of these changes point towards faster oil degradation.

Moreover, the continuous evolution of environmental requirements and the emergence of different post-treatment systems have caused a revolution in the lubricants additive field, equivalent to the

appearance of zinc dialkyldithiophosphate several decades ago.^{21,22} The need to reduce the presence of sulphur and phosphorus in exhaust gases caused the evolution of the base oil and additives to formulations with less content of these zinc dialkyl dithiophosphate (ZDDPs), and with the presence of other chemical functional element—calcium (Ca), molybdenum (Mo), etc.—and consequently varying performance

(ACEA), American Petroleum Institute (API), International Lubricants Standardization and Approval Committee (ILSAC), and several OEM's specifications,²⁴ but there is no concise study focusing on what happens during its use in real world conditions, specially related to degradation, including oxidation and nitration.

Oxidation is defined as a reaction involving oxygen and the typical final product of oxidation in common reactions of engine oils is an acid. Hydrocarbon oxidation to an acid involves complex steps where many different compounds are produced. On the other hand, nitration implies a similar phenomenon related with nitrogen oxides. These processes are the major source of oil degradation and its consequences are well known: viscosity increase, varnish formation, sludge and sediment formation, additive depletion, base oil breakdown, filter plugging, loss of foam resistance, loss of demulsibility, acid number increase, rust, and corrosion. Therefore, understanding and controlling them is a major concern for the lubricant formulator.

There are two main ways to evaluate degradation. Many laboratory tests are used to study the oxidation performance of new fluids, including ASTM D2272 (rotary pressure vessel oxidation test (RPVOT)), D4310 (sludging), D943 (turbine oil stability test (TOST)), and D6514 (universal oxidation test (UOT)). On the other hand, there are several in-service oil tests including total base number (TBN), total acid number (TAN), wear metal analysis (including iron, lead, and copper), RULER, and FT-IR spectroscopy, that have been used widely to study the effects of oil degradation during oil service life.²⁵

Oil analysis

In order to know thoroughly the phenomena that are taking place within the oil, there are a number of analytical techniques based on different physicochemical principles to detect the evolution of the lubricant, the emergence of several chemicals and disappearance of functional components.

Kinematic viscosity

Viscosity is a measure of flow resistance, and it not only affects tribological performance but also the sealing effect of oils and the rate of oil consumption. Oil viscosity is measured most commonly by kinematic viscosity (KV), usually at 40C and 100C.

In this investigation, the variation of this viscosity was studied along the ODI. Viscosity is a key factor regarding lubricant performance, and the list of root causes that can alter viscosity is quite extensive. A decrease in viscosity

of these new lubricants.²³

Therefore, the emergence of new formulations is accompanied by a specific study of their performance and the possible effects on degradation and durability of these novel oils.

At the moment, there are whole tests series to evaluate oil performance; clearly marked on the European Automobile Manufacturers' Association

may occur when nonlubricants like water and diesel fuel accidentally get into the lubricant. Another way the lubricant could be losing its viscosity is through the loss or shear down of the viscosity-index (VI) improver. Besides, typical oxidation processes result in higher viscous species, increasing the net viscosity of the lubricant.

Fourier transform infrared spectroscopy

Fourier transform infrared (FT-IR) is one of the most widely used tools in oil analysis, due to its ease of implementation, its capacity to detect oil condition variations, and its quick response. FT-IR is based on the fundamental principles of molecular spectroscopy, where different types of molecules absorb specific wavelengths, thus pointing their presence. The benefit is that different types of molecules such as the presents in additives, water, fuel, and glycol have different functional groups. Therefore, it is possible to determine the presence of different molecules in the sample with FT-IR, simply by measuring the infrared absorption at different wavelengths. Industry standards present well-known FT-IR measurement procedures, including also water and soot contamination in used engine oils.²⁶

Among others, oil oxidation and nitration of lubricant represent some of the most important parameters in order to fully understand the degradation process in oil. There is recent research about its origins and its evolution along ODI, and there are some expectations to find more specific ways to detect oil deterioration point through this parameters.²⁷⁻²⁹

On the other hand, FT-IR has been assessed recently as an analytical technique to detect presence of certain types of additives (due to the presence of characteristic molecular bonds), and some methodologies have been developed to quantify them.³⁰ In this study, it has been used to quantify the aminic and antiwear additive depletion, using FT-IR spectra methodology measurement procedures based on ASTM D6810³¹ and ASTM D6971.³²

In Table 1, a basic description of the FT-IR quantification measurement procedures is presented.

Linear sweep voltammetry (RULER)

Virtually every lubricant formulation contains antioxidants. These additives are designed to be sacrificial, meaning they oxidize before any other component of the lubricant, thereby protecting it. This oxidative protection is the only process saving the lubricant from premature failure. Based on the linear sweep voltammetry principle,³³ this technique is capable to detect different antioxidant additives presence in the lubricant, and its depletion along the ODI,³⁴ due to

the potential oxidation of the different additives present in the lubricant.

TAN/TBN

The total base number (TBN) describes the level of alkalinity reserve of oil, responsible for the neutralization of acidic contaminants coming from the engine.

Table 1. Summary of FT-IR measurement methodologies. Adapted from Macia'n et al.³⁰ and ASTM E2412.²⁶

	Oxidation	Nitration	Soot	Aminic	Antiwear
Units	Abs/cm ¹	Abs/cm ¹	%	Abs/cm ¹	Abs/cm ¹
Test method	Peak area	Peak area	Peak height	Peak area	Peak area
Frequency range (cm ¹)	1725–1650	1650–1600	1999.86	1550–1490	1026–941
Baseline 1 (cm ¹) start to stop	2200–1900	2200–1900	2200–1900	2200–1900	1100–1098
Baseline 2 (cm ¹) start to stop	650–615	650–615	650–615	650–615	911–909
Correlation	–	–	Yes	–	–

In some cases, judging the quality of engine oil solely on its TBN s may not be enough, since incomplete neutralization of acids will result in a more acidic environment in the engine, where corrosion can occur. Corrosion may negatively impact the wear levels of all critical engine components such as journal bearings, piston rings, cylinder liners, and valve train components. So, in this case, measuring total acid number (TAN) offers complementary information about oil degradation.³⁵ In the present study, TAN and TBN were measured using the potentiometric titration principle, according to ASTM D664³⁶ and D2896³⁷ standards.

Test design and settings

There are several conditions to be taken into consideration in order to develop a valuable and significant test: the selection of vehicles, oils and operating conditions. In order to represent common engine diversity of a typical heavy duty fleet, three different vehicles were selected including two different engine technologies: diesel and compressed natural gas (CNG). Other considerations assumed were the maximization of data obtained, since real world test include a lot of variability phenomena. But, in real-world scenario it was not possible to develop the test including all conditions desired, mainly due to fleet operator restrictions and ICE manufacturer specifications.

Bus fleet

A public transport fleet from the city of Vale`ncia (Spain) was selected for this test. In order to broaden the range, different models of buses were chosen with two different heavy-duty engine technologies: diesel and CNG. In addition, two different diesel engines were used, certified with different emissions standards (Euro IV and Euro V) corresponding with most modern vehicles. The list of main characteristics related with vehicles and engines are presented in Table 2. It is important to state that all fuels used in this test were commercially available and they met European fuel

requirements (UNE-EN 590 for diesel fuel, and Commission Directive 2001/27/EC for CNG). Brake mean effective pressure (bmep) is a relative engine performance indicator, obtained by dividing the work per cycle by the cylinder volume displaced per cycle.³⁸

Engine oils

As said before, the main purpose of this study was to assess the effect of the use of LVO in real conditions. Although the initial plan was to implement just two oils, considering one high viscosity SAE grade versus one low-viscosity SAE grade, requirements derived from engine manufacturer (homologated products), fleet company (assurance warranty coverage), and oil supplier (commercially available products) led to change that previous assumption. Finally, four different commercial oils were chosen, two LVO considered as candidates, and two higher viscosity grade oils, considered as a reference baseline. Main characteristics of fresh oils can be found in Table 3.

Due to the requirements mentioned above, lubricants and bus models were matched as shown in Table 4.

In order to improve the representativeness of the test, it was decided to divide the experiment into two phases, corresponding to two oil drain intervals of 30,000 km each one. Oil sampling is an important issue in this type of tests, since the sample must be representative of the lube in the engine evaluated, setting proper sampling frequencies to fulfill study objectives. Sample frequency in this test it has been set each 3000 km. Oil sampling procedure was performed following ASTM D-4057 standard.³⁹

Some previous remarks should be taken into account. In order to better understand the degradation process and its evolution, oil formulation is a key parameter and it is necessary to consider some statements regarding fresh oil characteristics, for future analysis and conclusions.

Base oils: From previous information managed it is clear that there are two levels of base oil quality. Baseline oils present API G-I and API G-III formulations, while in the low-viscosity segment there are present a blend of API G-III and API G-IV base oils, increasing base oil quality and lubricant VI. This situation will lead to different degradation performance.

Sulphated ash, phosphorus, and sulphur (SAPS) content: As it has been mentioned above, in order to maintain engine manufacturer's recommendation it

Table 2. Bus models considered in the test and main characteristics.

	Diesel Euro IV	Diesel Euro V	CNG
Year	2008	2010	2007
Vehicle length/width/height (m)	17.94/2.55/3	11.95/2.55/3	12/2.5/3.3
Engine displacement (cm ³)	11,967	7200	11,967
Emissions standard	EURO IV	EURO V	EEV
Cylinder configuration	6-in-line	6-in-line	6-in-line
Max. effective power (kW)	220 at 2200 r/min	210 at 2200 r/min	180 at 2200 r/min
Max. effective torque (Nm)	1600 at 1100 r/min	1100 at 1100 r/min	880 at 1000 r/min
Oil fill volume [l]	31	29	33
bmep (bar)	16.8 at 1100 r/min	19.55 at 1100 r/min	9.24 at 1000 r/min
Thermal loading ^a (W/mm ²)	2.85	3.97	2.33
Turbocharging	TurboIntercooler	TurboIntercooler	TurboIntercooler
EGR (-)	NO	NO	-
Valve train configuration	OHV Roller follower (hardened steel)	OHV Cam follower (steel)	OHV Cam follower (steel)
Piston-cylinder interface	Hardened steel sleeve	Liner	Hardened steel sleeve
Piston rings:			
Compression ring	Ceramic chromium (3 mm)	Ceramic chromium (3.5 mm)	Ceramic chromium (3.5 mm)
Scraper ring	Chromium (3 mm)	Chromium (2.5 mm)	Phosphated (3 mm)
Oil control ring	Ceramic chromium (4 mm)	Chromium (4 mm)	Chromium (4 mm)
Connecting rod bearings	-	SteelAluminum coating SteelBronze/PbCu 3% coating	SteelBronze/PbCu 6% coating
Main shaft bearings	SteelBronze/Pb Cu 3% coating SteelBronze/Pb Cu sputter	SteelAluminum coating SteelBronze/Pb Cu 6% coating	SteelBronze/Pb Cu 3% coating
Camshaft bearings	Bronze/Pb	SteelBronze/Pb coating	SteelAluminum coating SteelBronze/Pb coating

^aIn terms of effective power per piston area. OHV: overhead valve train.

has been required to use different types of formulation. Additive package content presents also a difference between reference and LVO. Oil B and D are considered low SAPS oils, so these formulations present lower content of Zn and P, characteristic of a reduced amount of ZDDPs. Thus, less presence of ZDDP (and its antiwear and antioxidant properties) is overtaken by complementary additives, e.g. B- and Mo-based additives and organic friction modifiers.

Detergent selection and content: Based on oil elemental analysis obtained, there is a clear correlation between detergent content and TBN value on fresh oil, but just in oil B there is a high Mg-based detergent content, while Ca-based detergents are used in the other formulations.

Results and discussion

In the following section, the results of the test are presented.

Kinematic viscosity

In Figure 2, it can be observed that data obtained for the both ODI for kinematic viscosity at 40C and in each figure each engine technology and both types of oils tested are represented.

On the other hand, in Figure 3 the results for the same oil (Oil B and Oil C) applied in different technologies are depicted.

Kinematic viscosity at 100C was also measured. In Figure 4, data obtained for the both ODI for KV at 100C are presented, and in each figure is represented each engine technology.

On the other hand, in Figure 5 the results for the same oil (Oil B and Oil C) applied in different technologies are depicted.

Engine oil viscosity excursions have mainly two different causes leading to different responses: viscosity Table 3. Fresh oil main characteristics.

index improver (VII) shearing that leads to a viscosity decrease and base oil oxidation leading to a

	Oil A	Oil B	Oil C	Oil D
Type	Baseline Euro IV engine oil	Baseline Euro V/ CNG engine oil	Low-viscosity candidate Euro IV/Euro V engine oil	Low-viscosity candidate CNG engine oil
SAE grade	15W40	10W40	5W30	5W30
Density at 15C (g/cm ³)	0.887	0.859	0.861	0.855
API base oil	API G-I	API G-III	API G-III þ G-IV	API G-III þ G-IV
ACEA oil sequence	ACEA E7/E5	ACEA E6/E4	ACEA E7/E4	ACEA E6/E7/E9
Viscosity at 40C (cSt)	108	96	71	68
Viscosity at 100C (cSt)	14.5	14.4	11.75	11.7
Viscosity index (-)	>141	>145	>158	>169
HTHS viscosity at 150C (mPas)	4.082	3.853	3.594	3.577
TBN (mgKOH/g)	10	10	16	10
TAN (mgKOH/g)	2.5	2.7	2.1	2.1
Oxidation by FT-IR (Abs/cm ⁻¹)	7.73	8.12	8.23	12.66
Nitration by FT-IR (Abs/cm ⁻¹)	4.34	7.42	7.94	6.66
Calcium (ppm)	3350	1980	5200	2800
Boron (ppm)	4.5	195	300	6
Zinc (ppm)	1530	960	1340	930
Phosphorus (ppm)	1200	730	1160	800
Magnesium (ppm)	15	700	30	80
Molybdenum (ppm)	-	50	-	-

Table 4. Bus models selection and lubricants matching.

Bus model	Number of buses	Candidate engine oil (number of buses involved)	Baseline engine oil (number of buses involved)
Diesel Euro IV	9	C (4)	A (5)
Diesel Euro V	10	C (5)	B (4)
CNG	20	D (10)	B (10)

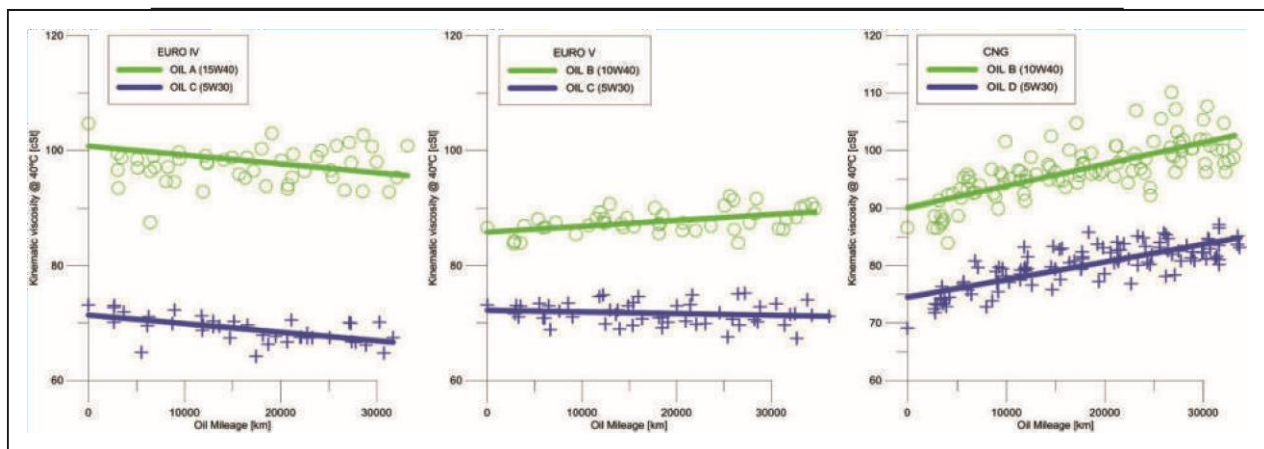


Figure 2. Kinematic viscosity at 40C along the ODI, for the oils used in Euro IV (left), Euro V (center), and CNG engines (right).

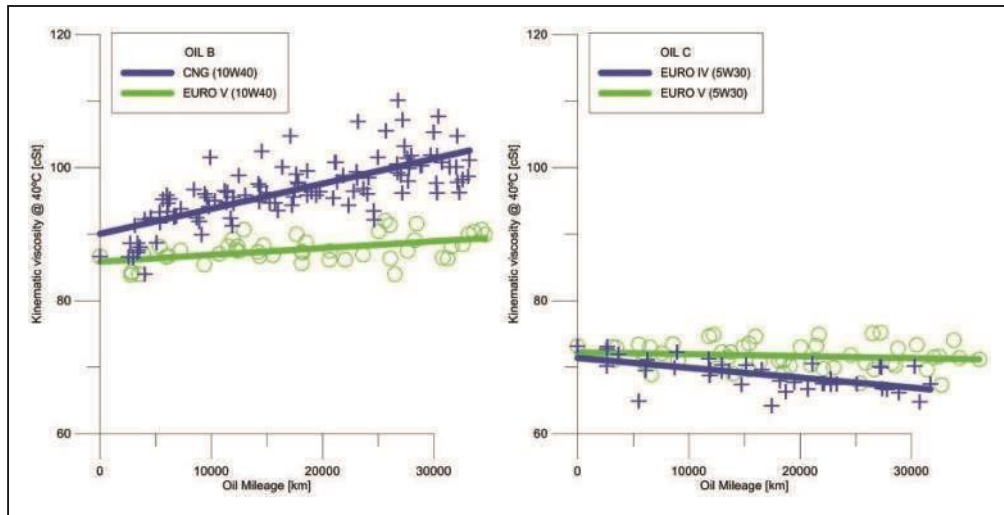


Figure 3. Kinematic viscosity at 40C along the ODI, for the Oil B (left), and Oil C (right).

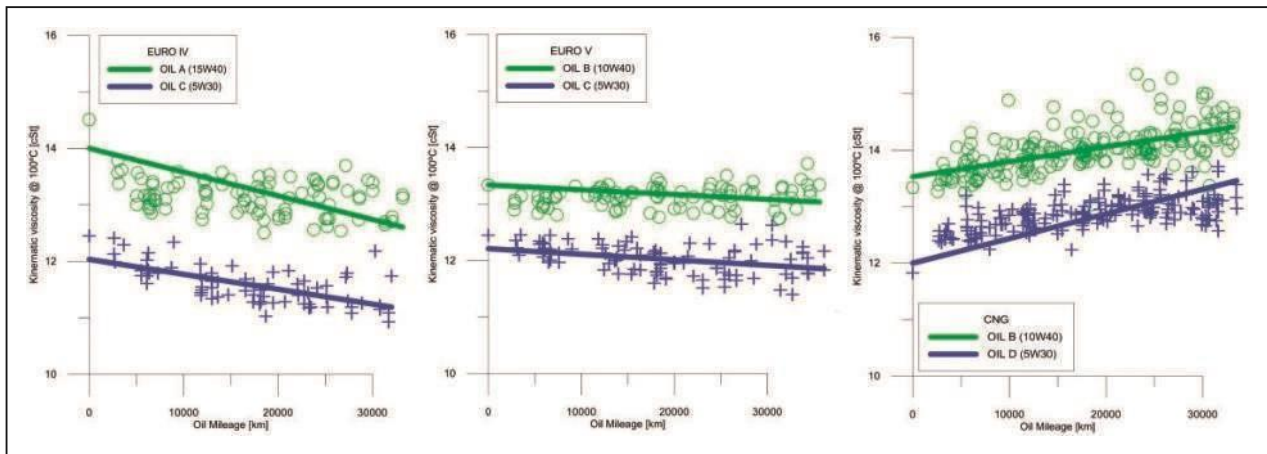


Figure 4. Kinematic viscosity at 100C along the ODI, for the oils used in Euro IV (left), Euro V (center), and CNG engines (right).

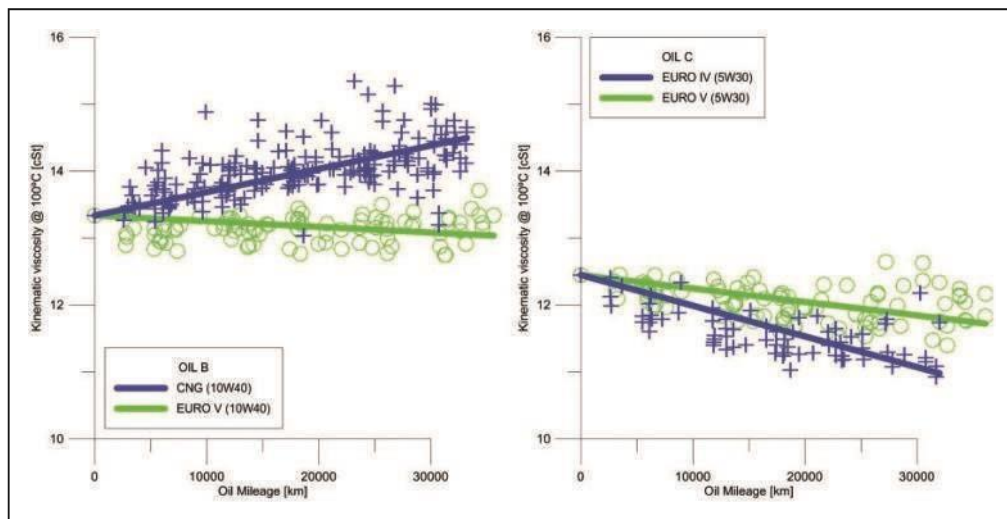


Figure 5. Kinematic viscosity at 100C along the ODI, for the Oil B (left), and Oil C (right).

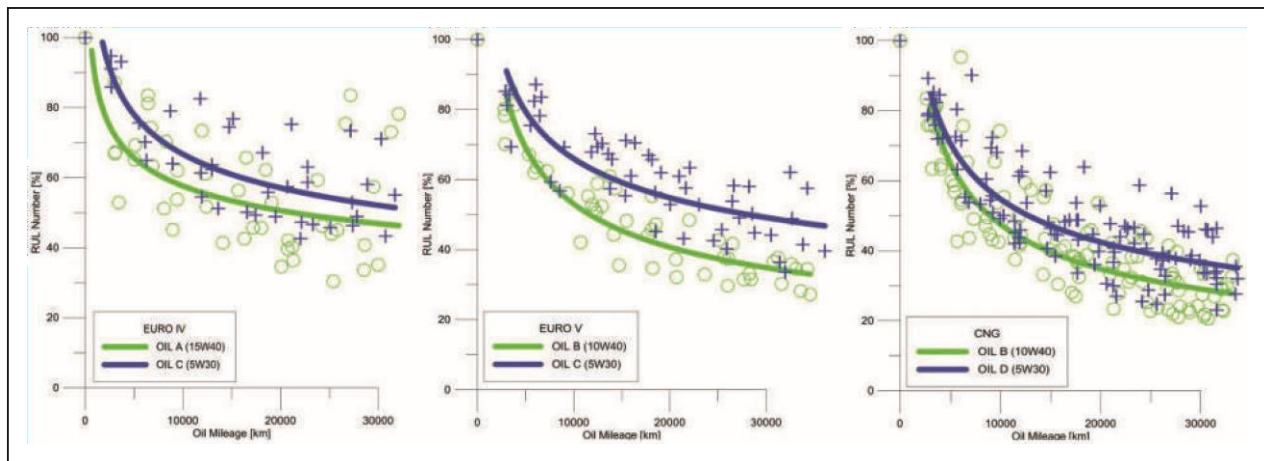


Figure 6. Antioxidant additive depletion along the ODI for oils used in Euro IV (left), Euro V (center), and CNG engines (right).

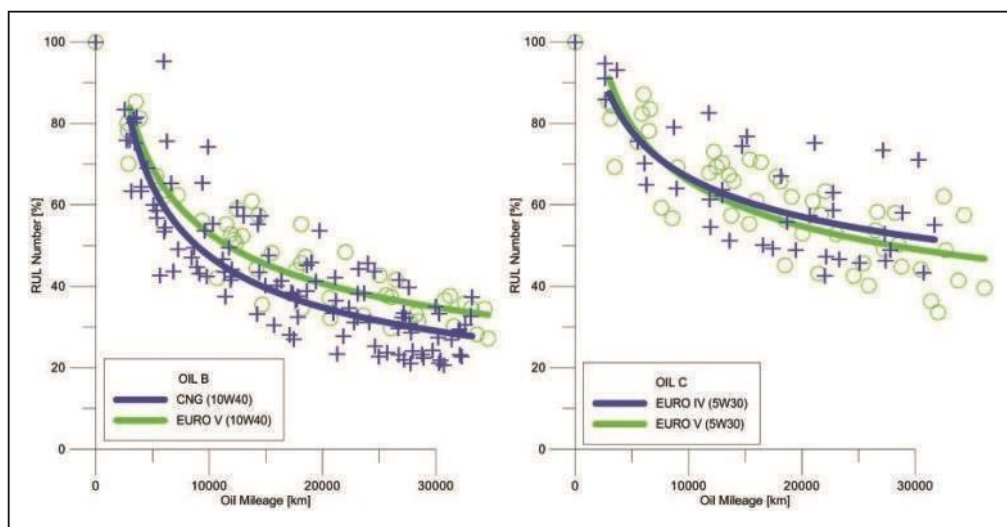


Figure 7. Antioxidant additive content along the ODI, for the Oil B (left), and Oil C (right).

viscosity increase. The prevalence of an effect upon other defines the viscosity variation along the ODI.⁴⁰ As can be observed on results depicted, in engines with comparative lower thermomechanical stress, VII shearing effects promotes a viscosity decrease, while if thermal stress is more important, base oil oxidation results in a net viscosity increase. As derived, CNG oils present a net increase in viscosity due to higher average combustion temperatures⁴¹ and in diesel technologies, Diesel Euro V engine is far more loaded than Diesel Euro IV engine, as pointed in the thermal loading parameter.

Antioxidant content (RULER)

In Figure 6, data obtained for the both ODI for antioxidant content by linear sweep voltammetry are presented, and in each figure is represented each engine technology.

On the other hand, in Figure 7 the results for the same oil (Oil B and Oil C) applied in different technologies are presented.

Results obtained show expected performance: engines with higher thermo-mechanical stress present an antioxidant additive depletion rate higher than the engines less stressed and furthermore, higher quality oil

formulations present a better response than less quality ones.

TAN/TBN

In Figure 8, data obtained for the both ODI for total acid number (TAN) are depicted, and in each figure is represented each engine technology.

On the other hand, in Figure 9 the results for the same oil (Oil B and Oil C) applied in different technologies are presented.

Also, total base number (TBN) was measured. In Figure 10, data obtained for the both ODI are depicted, and in each figure each engine technology is represented.

On the other hand, in Figure 11 the results for the same oil (Oil B and Oil C) applied in different technologies are presented.

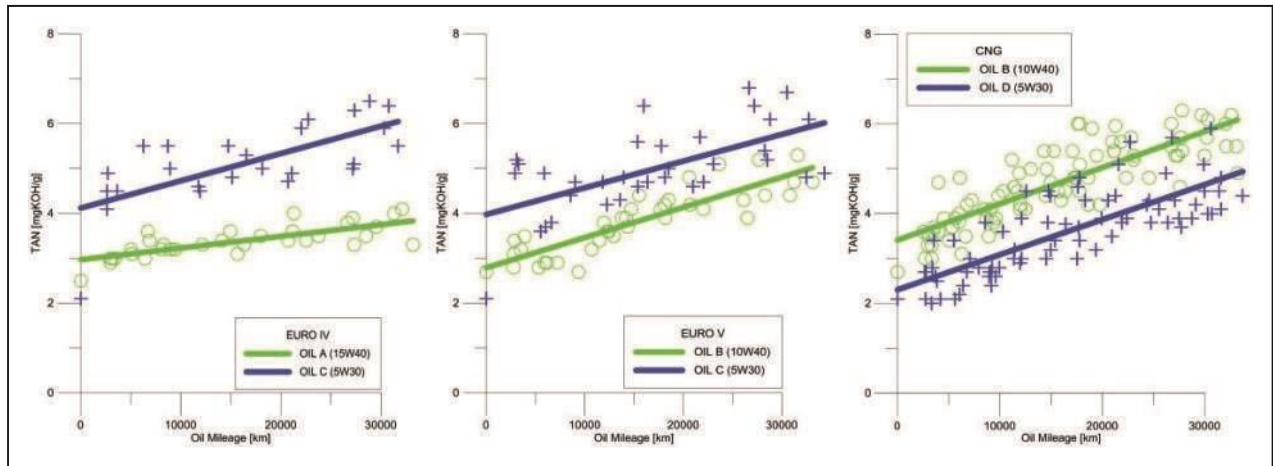


Figure 8. Total acid number (TAN) along the ODI, for the oils used in Euro IV (left), Euro V (center), and CNG engines (right).

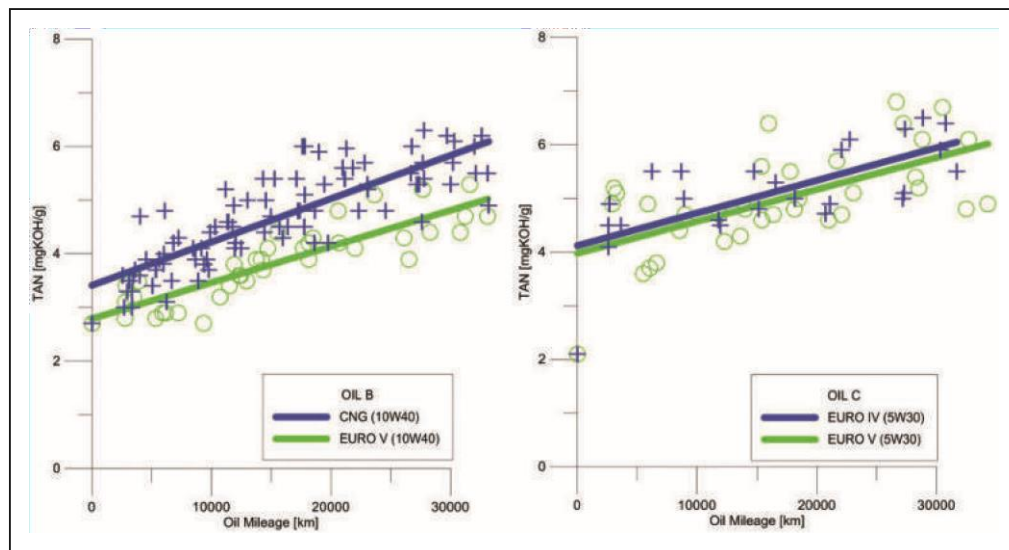


Figure 9. Total acid number (TAN) along the ODI, for the Oil B (left) and Oil C (right).

Regarding TAN, the main point is that a high level for TAN is reached for all oils, possibly influencing corrosive wear affecting lead and copper journal bearings. The case of Oil B is especially important since the use of a Mg-based detergent results in a higher increase of TAN, as seen in other studies.³⁵

TBN presented normal results, with Oil C presenting a greater TBN according to the higher content of Ca-based detergents. As in TAN data, results presented wide variation along the ODI, despite using low-sulphur fuel.⁴²

Oil oxidation and nitration

In Figure 12, data obtained for oil oxidation in each engine technology are presented.

On the other hand, in Figure 13 the results for the same oil (Oil B and Oil C) applied in different technologies are presented.

Nitration was also measured. In Figure 14, data obtained for the both ODI for nitration are presented, and in each figure each engine technology is represented.

On the other hand, in Figure 15 the results for the same oil (Oil B and Oil C) applied in different technologies are depicted.

Regarding to all scenarios shown, oxidation increases as expected but values reached at the end of the ODI are different depending on each category. In Diesel Euro IV, oxidation levels are similar for both oils, but in Diesel Euro V, reference oil showed higher oxidation rate than the low-viscosity candidate. In a comparative way, it can be clearly observed that oxidation level reached for Euro V diesel engines is quite higher than for Euro IV diesel engines. In CNG engines, both oils reached the highest levels of oxidation, probably as a consequence of higher thermal stress regarding to this technology compared versus diesel engines. Additionally, for CNG engines, it has been

additive package. For this case, LVO presents a better performance in terms of oxidation rate.

Nitration performance presented similar results to oxidation, but with less difference range between each technology. This could be linked with the difference in operating temperature in oil, that reduces the nitration effect as oil temperature exceeds certain level.²⁷

Aminic additives and antiwear additives (ZDDP) by FT-IR

In Figure 16, data obtained for the both ODI for aminic additives are depicted, and in each figure each engine

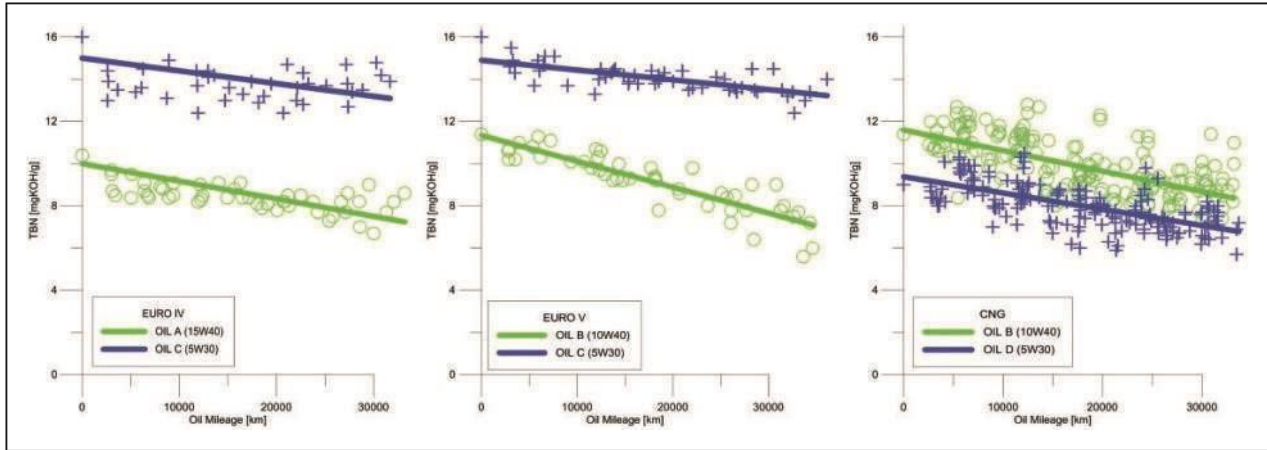


Figure 10. Total base number (TBN) along the ODI, for the oils used in Euro IV (left), Euro V (center), and CNG engines (right).

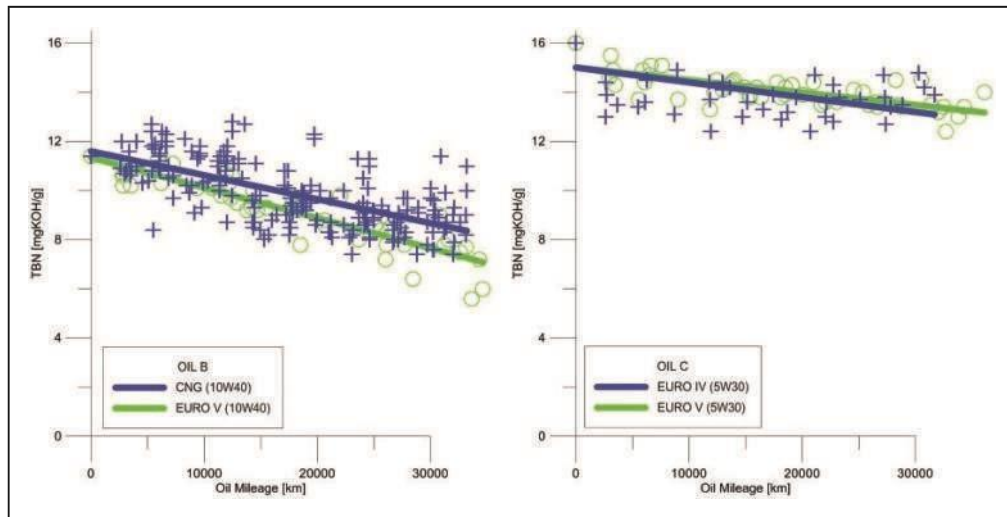


Figure 11. Total base number (TBN) along the ODI, for the Oil B (left), and Oil C (right).

observed that reference oil (15W40) performance is very similar compared with the LVO (5W30), even better can be assumed; but it has to be taken into account that initial point for fresh oils are quite different; a situation that has not been presented in other combinations. This situation can be completely understood when analyzing antioxidant content (related with aminic additives).

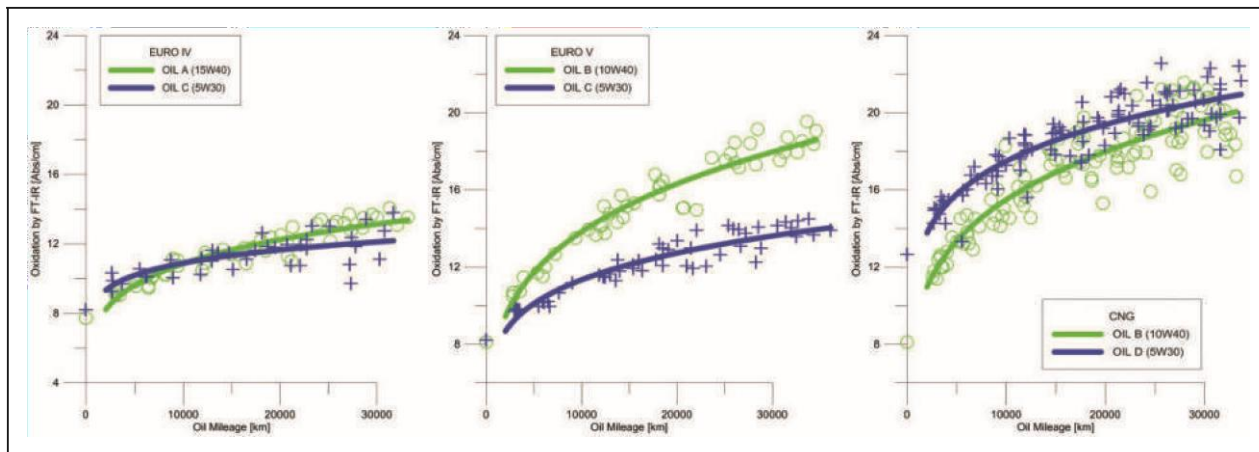
These results are closely related with the thermomechanical stress of each engine. Also, differences observed between each type of oil (reference versus candidate) can be attributable to different antioxidation

technology is represented.

On the other hand, in Figure 17 the results for the same oil (Oil B and Oil C) applied in different technologies are presented.

Antiwear additives content was also measured. In Figure 18, data obtained for the both ODI for antiwear additive content are presented, and in each figure each engine technology is depicted.

On the other hand, in Figure 19 the results for the same oil (Oil B and Oil C) applied in different technologies are presented.



Aminic additives, closely related with antioxidation characteristics, present linear depletion in all cases, depending on the initial content in fresh oil. It can be clearly observed that CNG engines present higher oxidation along the ODI, for the oils used in Euro IV (left), Euro V (center), and CNG engines (right).

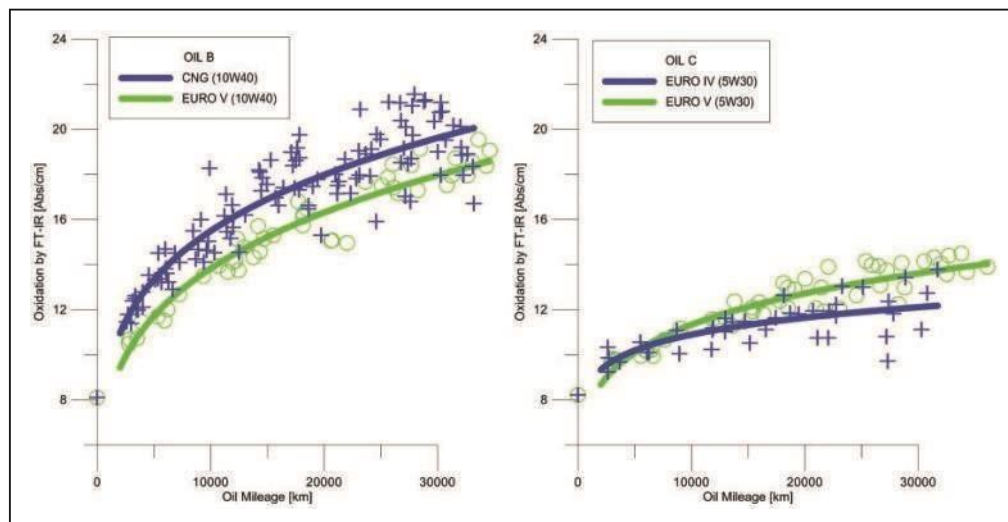


Figure 13. Oxidation along the ODI, for the Oil B (left) and Oil C (right).

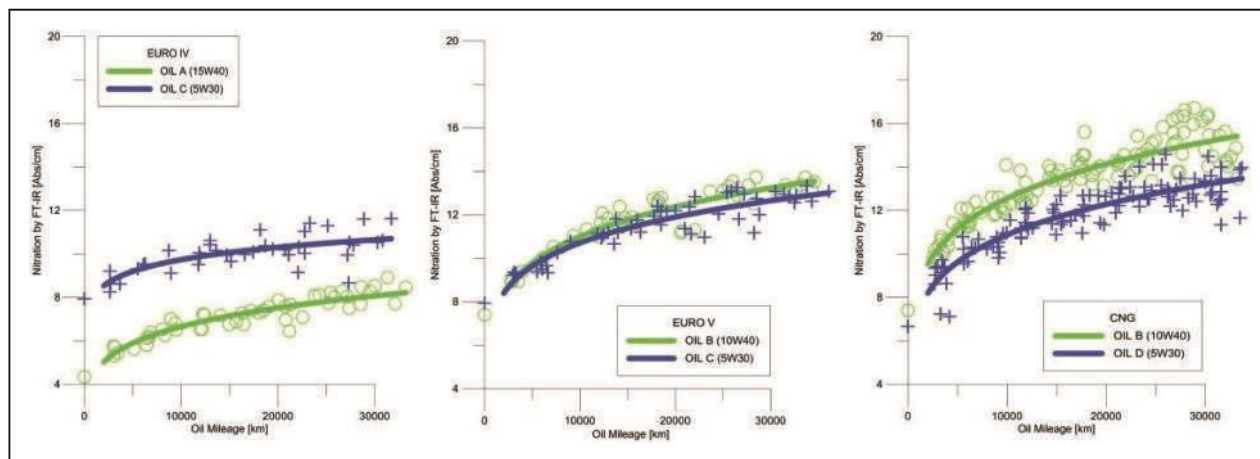


Figure 14. Nitration along the ODI, for the oils used in Euro IV (left), Euro V (center), and CNG engines (right).

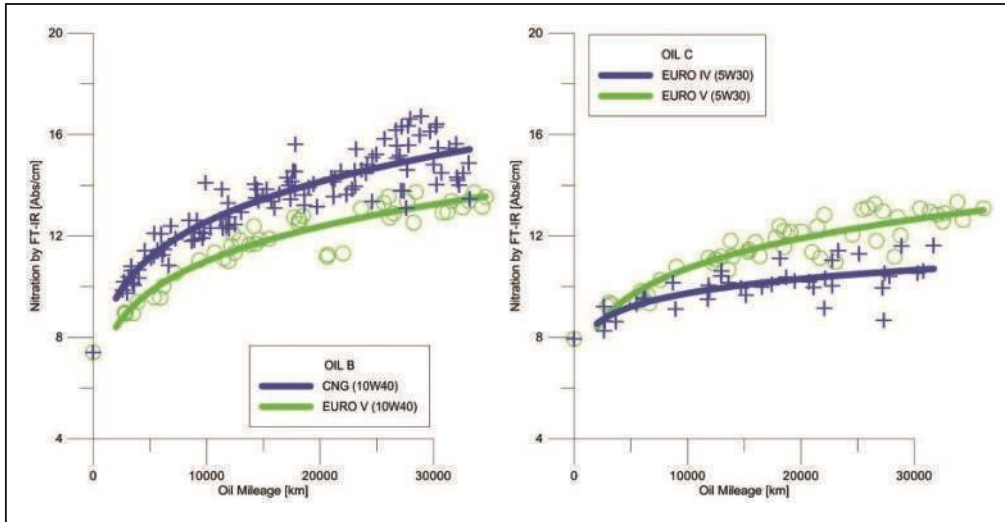


Figure 15. Nitration along the ODI, for the Oil B (left) and Oil C (right).

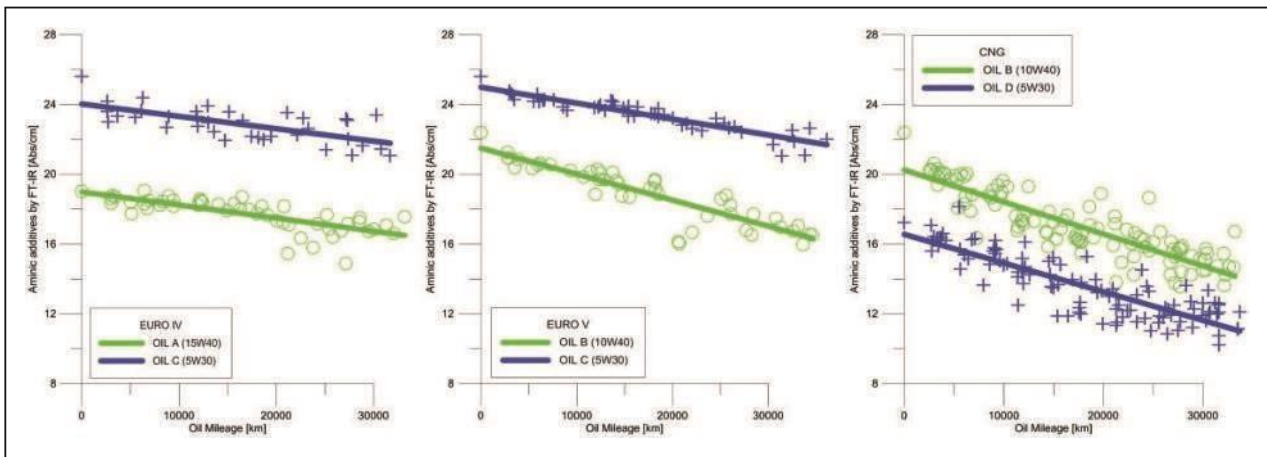


Figure 16. Aminic additives along the ODI, for the oils used in Euro IV (left), Euro V (center), and CNG engines (right).

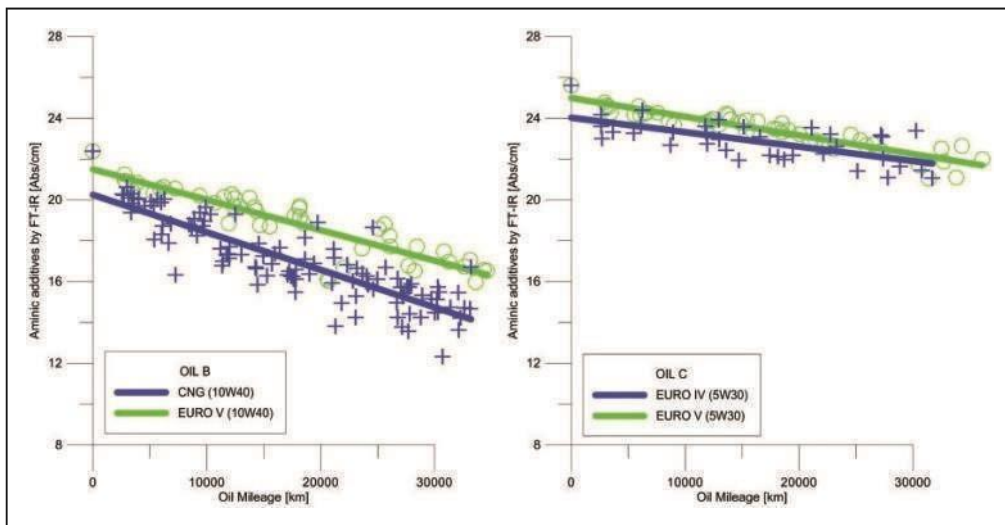


Figure 17. Aminic additives along the ODI, for the Oil B (left) and Oil C (right).

Figure 18. Antiwear additives along the ODI, for the oils used in Euro IV (left), Euro V (center), and CNG engines (right).

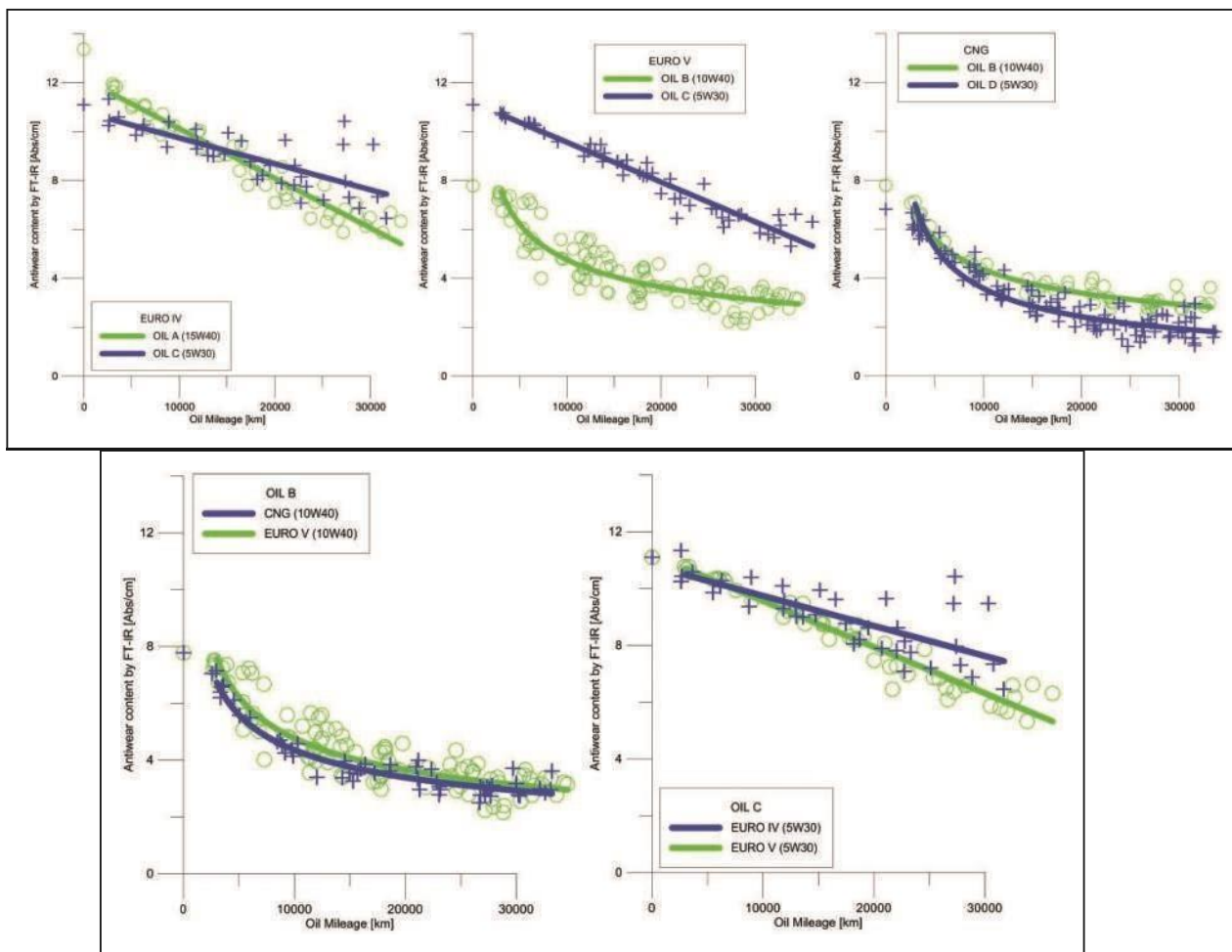


Figure 19. Antiwear additives along the ODI, for the Oil B (left) and Oil C (right).

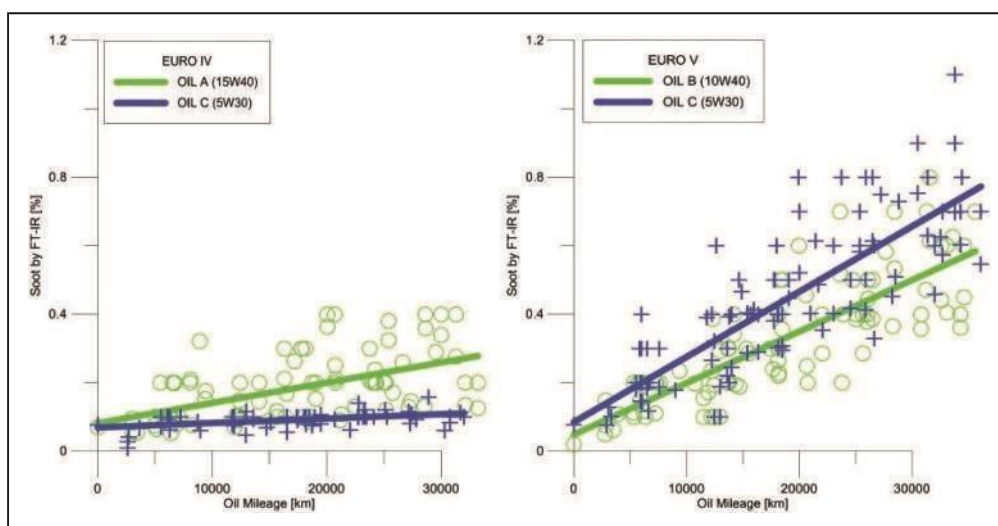


Figure 20. Soot along the ODI, for the oils used in Euro IV (left) and Euro V (right).

additive depletion rate as previously detected by RUL measurements.

In the case of Euro IV oils, there is a divergence between oxidation, RUL measurements and aminic additives measured trends. This can be justified due to the

fact that RUL also includes phenolic antioxidants in its measurements, and there is a blend of aminic and phenolic antioxidants in engine oil formulations used.

Related to antiwear additives, results have shown that exists two different depletion trends, one linear and one

power-based, probably as a consequence of different concentrations of ZDDP's compounds used in each formulation, since Oil A and C contain less quantity due to the SAPS restriction. In the case of Oil B, trend presents stabilization at the end of the ODI signaling a complete depletion.

Soot

Lastly, in Figure 20 data obtained for the both ODI for soot are depicted, and in each figure each diesel engine technology is represented.

Soot presents a normal relative increase along the ODI. However, there is an interesting divergence between oils in the case of EURO IV engines, probably because of different soot-handling additives of different oils, while in the case of EURO V they present the same trend.

Conclusions

This study was conducted in order to evaluate LVO performance on typical heavy duty engines used on a severe environment such as urban transport service, especially focused on oil degradation.

First of all, main conclusion is that LVO tested presented an excellent performance along the ODI considered, even improving some characteristics of the baseline oils considered. These results are key information for end-users, because they need to know that no negative effects are derived as a consequence of using those LVO. For instance, a reduction in ODI as a consequence of a lower oil performance can be directly translated in higher maintenance cost, obviously an absolutely non desired effect. On the other hand, results obtained cannot justify an enlargement of ODI for this type of engine under authors' point of view, at least if similar engine reliability performance is desired.

In the case of alkalinity, there have been reported TBN and TAN variation values higher than 15 years ago, even with stringent legislation about sulphur content in fuel, probably because of the additives basic nature and their variations along the study. The oil oxidation and nitration variation rely basically on engine technology, presenting a higher increase in CNG technology, even showing less thermomechanical stress (related to bmep). The main hypothesis to explain this phenomenon is related to the higher thermal stress presented in this engine.

Relative to additive content, different measurements on additive depletion are strictly related to each oil formulation, with lower influence related with engine design.

Acknowledgements

The authors would like to thank Repsol S.A. and EMT de Valencia for their collaboration. Additionally, the authors would like to thank Ruth Calatayud, Lorena Garzo´n, Leonardo Ramı´rez and Santiago Ballester for their help in this work.

Declaration of Conflicting Interests

The author(s) declared no potential conflicts of interest with respect to the research, authorship, and/or publication of this article.

Funding

The author(s) disclosed receipt of the following financial support for the research, authorship, and/or publication of this article: This study was funded by the Spanish Ministerio de Ciencia e Innovacio´n (Project no. TRA2012-30907).

References

1. Miller T. North American fuel economy testing. In: *15th annual fuels & lubes Asia Conference*, Singapore, 2009.
2. Covitch M, Brown M, May C, et al. Extending SAEJ300 to Viscosity Grades below SAE 20. *SAE Technical Paper* 2010-01-2286, 2010. DOI: 10.4271/2010-01-2286.
3. Holmberg K, Andersson P and Erdemir A. Globalenergy consumption due to friction in passenger cars. *Tribol Int* 2012; 47: 221–234.
4. Priest M and Taylor C. Automobile engine tribology—approaching the surface. *Wear* 2000; 241: 193–203.
5. Larsson R and Hou´glund E. Elastohydrodynamic lubrication at impact loading. *J Tribol* 1994; 116: 770–776.
6. Payri F and Desantes JM. *Motores de combustio´n interna alternativos*. Barcelona: Reverte´, 2011.
7. Taylor CM. *Engine tribology*. Tribology. Amsterdam: Elsevier Science Publisher, 1993.
8. Van Dam W, Miller T and Parsons G. Optimizing lowviscosity lubricants for improved fuel economy in heavy duty diesel engines. *SAE Technical Paper* 2011-01-1206, 2011.
9. Solomon L. Lifting the cap on drain intervals. *Lubes 'n'Greases*, July 2011, pp.38–45.
10. Macian V, Tormos B, Ruiz S, et al. In-use comparison to evaluate the effect of low viscosity oils on fuel consumption of diesel and CNG public buses. *SAE Technical Paper* 2014-01-2794, 2014.
11. Souza de Carvalho MJ, Rudolf Seidl P, Pereira BelchiorCR, et al. Lubricant viscosity and viscosity improver additive effects on diesel fuel economy. *Tribol Int* 2010; 43: 2298–2302.
12. Manni M and Florio S. An experimental evaluation of the impact of ultra low viscosity engine oils on fuel economy and CO₂ emissions. *SAE Technical Paper* 2013-01-2566, 2013.
13. Browne D, Dewey M, Graham S, et al. Novel fuel efficiency engine lubricants for urban transit applications. *SAE Technical Paper* 2014-01-2793, 2014.

14. Fontaras G, Vouitsis E and Samaras Z. Experimentalevaluation of the fuel consumption and emissions reduction potential of low viscosity lubricants. *SAE Technical Paper* 2009-01-1803, 2009.
15. Carden P, Pisani C, Andersson J, et al. The effect of lowviscosity oil on the wear, friction and fuel consumption of a heavy duty truck engine. *SAE Technical Paper* 2013-01-0331, 2013, pp.311–319.
16. Steinschu"tz K, Geringer B, Jech M et al. Impact of oil aging on wear of piston ring and cylinder liner system. *SAE Technical Paper* 2010-32-0124, 2010.
17. Macia' n V, Tormos B, Ruiz S, et al. Potential of low viscosity oils to reduce CO₂ emissions and fuel consumption of urban buses fleets. *Transp Res Part D Transp Environ* 2015; 39: 76–88.
18. Jang J, Lee Y-J, Kwon O, et al. The effect of engine oil on particulate matter, emissions and fuel economy in gasoline and diesel vehicle. *SAE Technical Paper* 2014-01-2837, 2014.
19. Manni M, Gommellini C and Sabbioni G. Effect ofphysical characteristics of lubricating oils on emissions, fuel economy and oil consumption in a light duty diesel engine. *SAE Technical Paper* 952552, 1995.
20. Green DA and Lewis R. The effects of soot-contaminated engine oil on wear and friction: A review. *Proc IMechE, Part D: J Automobile Engineering* 2008; 222: 1669–1689.
21. Rudnick LR. *Lubricant additives: Chemistry and applications*. Boca Raton: CRC Press, 2009.
22. Spikes H. The history and mechanisms of ZDDP. *Tribol Lett* 2004; 17: 469–489.
23. Rizvi SQA. *A comprehensive review of lubricant chemistry, technology, selection and design*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2009.
24. Afton Chemical. *Specification handbook*. New York: Afton Chemical, 2013.
25. Tormos B. Engine condition monitoring based on oilanalysis. In: *Encyclopedia of tribology*. Boston, MA: Wiley, 2013, pp.970–977.
26. ASTM International. *Standard practice for condition monitoring of used lubricants by trend analysis using fourier transform infrared (FT-IR) spectrometry*. ASTM E2412. West Conshohocken, PA: ASTM, 2010.
27. Coultas D. New insights into the ageing processes ofengine oils. In: *UNITI mineral oil technology congress*, Stuttgart, 2015.
28. Macia' n V, Tormos B, Go' mez YA, et al. Proposal of an FTIR methodology to monitor oxidation level in used engine oils: Effects of thermal degradation and fuel dilution. *Tribol Trans* 2012; 55: 872–882.
29. Tormos B, Olmeda P, Gomez Y, et al. Monitoring andanalysing oil condition to generate maintenance savings?: A case study in a CNG engine powered urban transport fleet. *Insight* 2013; 55: 84–87.
30. Macia' n V, Tormos B, Olmeda P, et al. Findings from a fleet test on the performance of two engine oil formulations in automotive CNG engines. *Lubric Sci* 2013; 27: 15–28.
31. ASTM International. *Standard test method for measurement of hindered phenolic antioxidant content in non-zinc turbine oils by linear sweep voltammetry*. ASTM D6810. West Conshohocken, PA: ASTM, 2013.
32. ASTM International. *Standard test method for measurement of hindered phenolic and aromatic amine antioxidant content in non-zinc turbine oils by linear sweep voltammetry*. ASTM D6971. West Conshohocken, PA: ASTM, 2014.
33. Fentress A, Sander J, Ameye J, et al. The use of linearsweep voltammetry in condition monitoring of diesel engine oil. *J ASTM Int* 2011; 8: 103442.
34. Livingstone G, Ameye J. Antioxidants monitoring aspart of lubricant diagnostics. In: *OilDoc conference*, Rosenheim, 2015.
35. Van Dam W. Measuring reserve alkalinity. *Pract Oil Anal* 2002; 7.
36. ASTM International. *Standard test method for acid number of petroleum products by potentiometric titration*. ASTM D664. West Conshohocken, PA: ASTM, 2011.
37. ASTM International. *Standard test method for base number of petroleum products by potentiometric perchloric acid titration*. ASTM D2896. West Conshohocken, PA: ASTM, 2011.
38. Heywood JB. *Internal combustion engine fundamentals*. New York: McGraw-Hill, 1988.
39. ASTM International. *Standard practice for manual sampling of petroleum and petroleum products*. ASTM D4057. West Conshohocken, PA: ASTM, 2012.
40. Van Dam W, Miller T, Parsons GM, et al. The impactof lubricant viscosity and additive chemistry on fuel economy in heavy duty diesel engines. *SAE Technical Paper* 2011-01-2124, 2011.
41. Totten GE. *Handbook of lubrication and tribology: Volume I. Application and maintenance*. Boca Raton: CRC Press, 2006.
42. Macia' n V, Tormos B and Lerma J. Evaluation of used lubricant behaviour in industrial vehicles engines in the 1990s. *SAE Technical Paper* 2000-01-1824, 2000.

Revisión del proceso de la degradación en los aceites lubricantes en motores de gas natural comprimido y diesel



Vicente Macián-Martínez Dr. Ingeniero Mecánico
Bernardo Tormos-Martínez Dr. Ingeniero Mecánico
Yesid-Antonio Gómez-Estrada Ingeniero Químico
Vicente Bermúdez-Tamarit Dr. Ingeniero Mecánico

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA. IU CMT - Motores
Térmicos. Camino de Vera, s/n - 46022 Valencia. Tfno: + 34 963 877650.
vmacian@mot.upv.es

Recibido: 18/05/2012 • Aceptado: 08/10/2012

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/5077>

*A REVIEW OF DEGRADATION PROCESS ON
COMPRESSED NATURAL GAS AND DIESEL
ENGINES LUBRICANT OILS*

ABSTRACT

• In this study, a representative sample of urban buses, powered with CNG and diesel engine technologies and working on urban duty operation, have been studied in order to evaluate engine oil evolution of degradation. Main parameters evaluated have been related with oil degradation: oxidation, nitration, viscosity, Antioxidant additives depletion, antiwear, TAN, TBN and RUL Number. Results obtained have shown higher degradation rates for oils used on CNG engines than diesel engine. CNG engines studied showed a high thermal and mechanical stress, and lower oil sump volume. Experience with FT-IR technique on degradation study allowed to define optimal spectral ranges to quantify the changes of oxidation, nitration and fuel dilution problem in MCI.

• **Keywords:** Degradation, compressed natural gas engine, oxidation, nitration, RUL - remaining useful life number and oil stress factor.

RESUMEN

En este estudio, una muestra representativa de autobuses de servicio urbano, con motorizaciones GNC y diesel, han sido estudiados con el fin de evaluar la evolución de la degradación de sus aceites. Los principales parámetros evaluados en relación con la degradación del aceite son: oxidación, nitración, viscosidad, agotamiento de los aditivos antioxidantes amínicos, antidesgaste, TAN, TBN y el número RUL.

Los resultados obtenidos evidencian mayores tasas de degradación de los aceites usados en los motores GNC frente a los motores diesel. Los motores de GNC estudiados presentan una mayor exigencia a sus aceites al contar con mayores sollicitaciones térmicas, mecánicas, y menor volumen del cárter de aceite. La experiencia adquirida con la aplicación de la técnica de FTIR para el estudio de la degradación, ha permitido definir rangos espectrales óptimos para cuantificar los cambios de oxidación, nitración y presencia de combustible en MCI.

Palabras clave: Degradación, motores de gas natural comprimido, oxidación, nitración, RUL - vida remanente del aceite, factor de estrés del aceite

1. INTRODUCCIÓN

Durante el desarrollo de este trabajo, dos tipos de motores de combustión interna alternativos han sido considerados: *Gas Natural Comprimido* (GNC) y diesel, como las configuraciones de mayor aplicación actual en flotas de transporte urbano. Estos motores presentan diferencias significativas como son: sus ciclos termodinámicos y las características de los combustibles empleados, pero sobre todo presentan algunas diferencias muy importantes de cara al proceso de degradación del aceite lubricante, a pesar de contar con el mismo periodo de servicio según sus fabricantes. Los motores GNC cuentan con una presencia muy baja de materia carbonosa en los productos de la combustión y carecen de problemas por dilución de combustible al utilizar un combustible gaseoso¹. Con una combustión más “limpia” frente a la combustión de gasoil, los requerimientos para los aceites lubricantes en motores GNC cuentan con menores exigencias en cuanto a capacidad de detergencia y dispersancia, lo que permite a estos aceites ser formulados con menores niveles de contenido en cenizas, reduciendo la probabilidad de formación de depósitos que puedan provocar problemas de detonación. En contraposición, las mayores temperaturas de combustión en motores GNC, conducirán a mayores niveles de oxidación y nitración del aceite, como consecuencia de dichas sollicitaciones térmicas llegando a ocasionar en muchos casos mayores niveles de degradación del aceite lubricante

^{2,3}.

A pesar de las ventajas presentadas en estos motores de tipo GNC, trabajos previos desarrollados por la línea de investigación del *Departamento de Maquinas y Motores Térmicos de la UPV*⁴⁻⁶ muestran que, al utilizar un aceite de tipo mineral en vehículos GNC con las características de los motores estudiados, hay una clara disminución de los paquetes de aditivos, incrementos en la acidificación del lubricante y elevados valores en la tasa de desgaste de algunos metales como el cobre y plomo, que podrían poner en riesgo el desempeño del motor. Frente a esta problemática, dos tipos de soluciones pueden ser adoptadas: reducción del periodo de servicio del aceite lubricante o la utilización de un aceite con una mejor formulación en cuanto a sus paquetes de aditivos y características de su base lubricante; permitiendo en ambos casos alcanzar los periodos de servicio establecidos por los fabricantes, sin que ello suponga un alto riesgo de fallo en los motores.

Este trabajo conducirá a la evaluación detallada de los procesos de degradación en estas dos tipologías de motores, utilizando para los motores GNC dos formulaciones de aceites lubricantes (Tipo I y II), y una formulación para los motores diesel (tipo III), que servirá como comportamiento de referencia. Todas las formulaciones de aceites lubricantes empleadas en el estudio son homologados por los fabricantes de los vehículos.

Teniendo en cuenta que las configuraciones de los motores involucrados son diferentes, se debe emplear algún parámetro que haga posible dicha comparación descartando los efectos de tamaño. Por una parte, se podría emplear la *presión media efectiva* (pme) o la *potencia por unidad de área de pistón*, de modo que pudiese representar una medida de la carga térmica o mecánica soportada por el motor, por otro lado podría utilizarse la potencia por unidad de cilindrada como un indicador de la efectividad relativa con la que se

utiliza dicho volumen. Finalmente se optó por un parámetro que incluye los aspectos mencionados anteriormente más aquellos que están directamente relacionados con el aceite. Este parámetro es el llamado *Factor de Stress del Aceite (OSF: Oil Stress Factor)*. Este parámetro ha sido utilizado como estimador del potencial estrés que sufre el aceite y permite cierta correlación con su posible degradación como consecuencia del diseño del motor ^{4,7,8}. El OSF considera la relación existente entre la potencia específica por cilindrada, el periodo de servicio de aceite y el volumen de cárter, como se muestra en la ecuación siguiente.

$$OSF \left(\frac{kWkm}{l^2} \right) = \frac{Potencia [kW]}{Cilindrada [l]} \times \frac{Periodo de Servicio [km]}{Volumen del Cárter [l]}$$

2. EQUIPOS Y METODOLOGIAS

Diferentes técnicas de análisis de aceite han sido utilizadas durante el estudio de la degradación de aceites lubricantes en motores de combustión interna de tipo GNC y diesel. Una de las principales y en las cuales se ha centrado parte de estos estudios es la espectrometría infrarroja por transformada rápida de Fourier (FT-IR).

FT-IR es la principal técnica analítica para determinar productos de la degradación (oxidación, nitración), así como el agotamiento de los paquetes

Fig. 1: Diagrama de un espectrómetro por transformada de Fourier



Un espectrómetro por transformada de *Fourier* consta de tres elementos básicos: una fuente luminosa, un interferómetro de Michelson y un detector. La radiación infrarroja que se genera en la fuente luminosa, incide sobre un divisor de haz. El haz incidente se divide en dos haces perpendiculares de igual energía, uno de los cuales incide sobre el espejo móvil y el otro sobre el espejo fijo. El haz resultante pasa a través de la muestra, en donde sucede una absorción selectiva de longitudes de onda llegando al detector. La fase final del proceso del espectrograma se completa realizando un espectro del ruido de fondo (*background*) mediante la recogida de un interferograma, siguiendo un procesamiento de los datos mediante transformada de Fourier para obtener finalmente el espectrograma de la muestra.

2.1. ESPECIFICACIONES DE LOS EQUIPOS, TÉCNICAS ANALÍTICAS Y METODOLOGÍAS

2.1.1. Espectrometría infrarroja por transformada rápida de Fourier (FT-IR)

Las medidas de los niveles de oxidación, nitración y paquetes de aditivos de tipo amínicos y antidesgaste fueron realizadas a través de un equipo de espectrometría infrarroja por transformada rápida de Fourier, cuyas características son presentadas en la Tabla 1.

Características	FT-IR iPAL
Rango Espectral	4.700 cm ⁻¹ a 590 cm ⁻¹
Resolución	4 cm ⁻¹
Escaneo de la muestra	128
Escaneo del ambiente	128
Longitud del paso de luz mm (µm)	0,1 (100)
Material de la celda	Seleniuro de Zinc (ZnSe)

Interface	Transmisión
	TumbIIR
Apodización	Triangular

Tabla 1: Características principales del FT-IR – iPAL A2 Technologies

se línea base, las mediciones de la altura y área del pico se realizarán sobre el eje de abscisas.

En todos los casos se calcularon los niveles de los parámetros de oxidación, nitración y paquetes de aditivos mediante la utilización de una línea base doble y los resultados fueron reportados en términos de absorbancia.

Con el fin de estudiar la degradación de los aceites lubricantes se deben identificar aquellos subproductos que presentan, debido al grupo C=O, rangos de absorción en un intervalo de frecuencias entre 1.850 cm⁻¹ y 1.620 cm⁻¹, ya que conforme aumenta la degradación de estos aceites lubricantes va aumentando la concentración de estos productos oxigenados y por consiguiente provoca un aumento de la absorbancia en esta zona ⁹⁻¹².

Tamarit

Con el fin de identificar y establecer los límites de detección por FT-IR (rangos espectrales) para los subproductos que provienen de la degradación térmica, se procedió a degradar bajo condiciones controladas en el laboratorio una serie de muestras de aceite lubricante, de tal manera que se pudo observar los cambios y las tendencias de los espectros. Este proceso de degradación térmica en el laboratorio fue llevado a cabo en baño térmico con un controlador de temperatura, en el cual se introdujo un *beaker* con un volumen de muestra de 100 ml. Se utilizó un termómetro ASTM 3C en el interior del *beaker* para llevar un mejor control de la temperatura. Los ensayos se realizaron utilizando dos mé-

Las metodologías aplicadas a través de esta técnica para cada una de las variables medidas se detallan en la Tabla 2.

La cuantificación de los diferentes parámetros a través de FT-IR se ha realizado a través de la medida de la altura (PH - *Peak Heigh*) y del área de pico (PA - *Peak Area*), utilizando una línea de referencia.

Esta línea de referencia puede ser: una línea base única, la cual constituye una línea paralela al eje de abscisas que se inicia en el punto más bajo del espectro dentro de un

para la medida de los niveles de oxidación presentes en los aceites.

	Oxidación	Nitración	Antioxidantes Amínicos (AA)	Antidesgaste
Metodología	ASTM D7214	ASTM D 2412	CMT-0124.12 (*)	CMT-0120.12 (*)
Unidades	(Abs·cm ⁻¹) / 0.1mm	(Abs·cm ⁻¹) / 0.1mm	(Abs·cm ⁻¹) / 0.1mm	(Abs·cm ⁻¹) / 0.1mm
Rango de frecuencia cm ⁻¹	1.725 – 1.650	1.650 – 1,600	1.550 – 1,490	1.026 - 941
Línea base 1 cm ⁻¹ (Inicio – Fin)	2.200 – 1.900	2.200 – 1.900	2.200 – 1.900	1.100 - 1.098
Línea base 2 cm ⁻¹ (Inicio – Fin)	650 - 615	650 - 615	650 - 615	911 – 909

Tabla 2: Metodologías aplicadas en los ensayos de FT-IR

(*) Designación correspondiente a metodologías internas del CMT. CMT-0124.12 y CMT-0120.12 están basadas en la normativa ASTM E 2412

intervalo definido. Los intervalos de la línea base se definen en un rango ligeramente mayor (+/- 10 cm⁻¹) al elegido para el cálculo de la variable (oxidación, nitración, etc.). El otro caso es utilizar una línea base doble, la cual se traza entre los intervalos donde se definen estas líneas base, seleccionando de cada intervalo el punto más bajo. En el caso de no tomartodos de calentamiento: uno isotérmico y uno dinámico con los siguientes valores de temperatura 200 °C, 220 °C, 240 °C y 260 °C. Al calentar la muestra se consigue degradar el aceite de tal manera que se incrementan sus niveles de oxidación y sus paquetes de aditivos antioxidantes se agotan. El tiempo total de degradación fue de 24 horas, durante el cual se muestreaba con una frecuencia de 3 horas. Posteriormente, dichas muestras eran analizadas a través de FT-IR, TAN, TBN y medida de la viscosidad cinemática. Todo el proceso fue realizado en el interior de una cabina cerrada con el fin de evitar la suspensión de partículas así como una posible contaminación de las muestras.

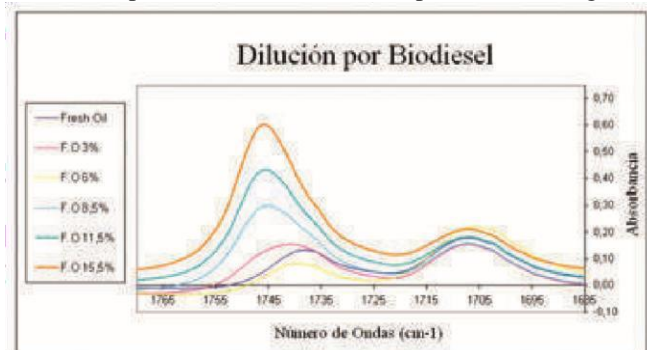
Como se observa en la Fig. 2, estos productos provenientes de una degradación isotérmica a 260 °C, presentan cambio significativos en el rango entre 1.725 cm⁻¹ y 1.650 cm⁻¹, motivo por el cual será este rango el utilizado

Fig. 2: Efecto de la temperatura en la zona de oxidación

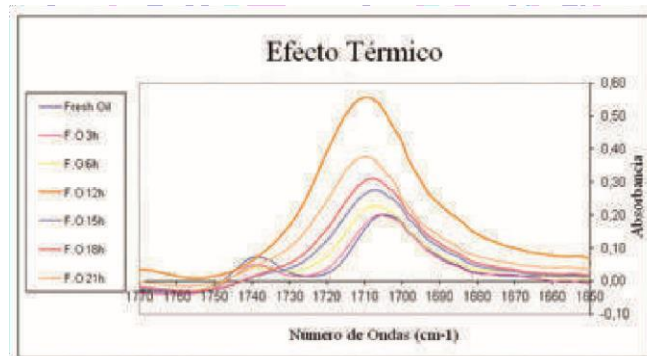
Además de producirse cambios en esta zona, se obtienen otros productos que provienen de las reacciones con el nitrógeno presente en el aire, ocasionando la nitración del aceite. Esta reacción tiende a incrementarse cuando las temperaturas son más altas. En condiciones reales de operación se suelen asociar con el incremento del “*blow-by*”, pues los gases calientes de combustión reaccionan con el aceite ó cuando se tienen dosados pobres. La medida de la nitración con FT-IR se ha realizado en la zona del espectro entre 1.650 cm⁻¹ y 1.600 cm⁻¹.

La otra variable que produce cambios significativos en esta zona del rango espectral (1.850 cm⁻¹ – 1.620 cm⁻¹), es la dilución por combustible en motores diesel, cuando se está utilizando biocombustibles. A pesar de que los combustibles fósiles no presenten dentro de sus estructuras compuestos que puedan producir cambio en esta zona espectral, la incorporación de los biodiesel hoy en día (hasta un 7 % v/v, según normativa Europea – UNE – EN 590)¹³, hace que estos lleguen a presentar alteraciones como consecuencia de

la presencia de los esteres como se puede observar en la Fig. 3. En esta ocasión se ha procedido a contaminar una muestra del aceite lubricante tipo III con distintas concentraciones de biodiesel. Por consiguiente, viendo los efectos que producen los potenciales problemas de dilución en aceites lubricantes para motores diesel, se utilizará la zona entre 1.770 cm^{-1} y 1.725 cm^{-1} para cuantificar los dichos problemas en lugar de



otras zonas del espectro (815 cm^{-1} – 745 cm^{-1} , como se puede observar en la Fig. 4) que suelen utilizarse para



combustibles convencionales según normativas.

Fig. 3: Nuevos rangos para la detección de la dilución por biodiesel

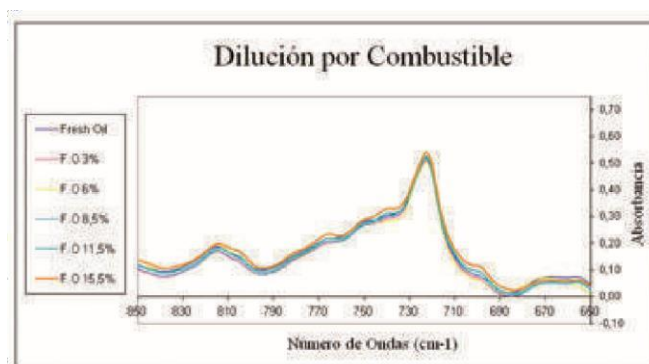
Fig.4: Rangos convencionales para la detección de la dilución por combustible

2.1.2. Viscosidad

La viscosidad es una de las características más importantes de los aceites lubricantes y se puede definir como la oposición de un líquido a fluir debido al rozamiento interno de sus propias moléculas. Para calcular la viscosidad cinemática se recurre al uso de viscosímetros siguiendo la metodología ASTM D445. Todos los ensayos utilizaron viscosímetros para líquidos opacos y fueron realizados a una temperatura de 40°C .

2.1.3. TAN y TBN

Los niveles de acidez (*Total Acid Number* – TAN) y de alcalinidad (*Total Basic Number* – TBN) han sido obtenidos mediante un equipo automático de titulación potenciométrica ORION 950, utilizando una metodología de “*primera derivada*”. Las soluciones de titulación utilizadas en este ensayo corresponden a las establecidas por



las normativas para los cálculos de acidez (ASTM D 664) y alcalinidad (ASTM D 2896).

2.1.4. Numero de RUL (Remaining Useful Life)

El numero de RUL o *vida remanente* del aceite lubricante ha sido calculado a partir de una técnica voltamperométrica. Para la medida del numero RUL, se utilizó un equipo de FLUITEC – RULER®, el cual se basa en la técnica de la voltamperometría lineal de barrido. Esta téc-

nica instrumental analítica permite oxidar o reducir compuestos disueltos en el seno de un disolvente mediante la aplicación de un potencial positivo o negativo, respectivamente. En este método voltamperométrico se varía el potencial aplicado con el tiempo, y a esta variación se le llama velocidad de barrido pudiendo variar desde mV/s hasta $1.000.000\text{ V/s}$.

Una de las aplicaciones de esta técnica es determinar la concentración de aditivos antioxidantes (AO) en el seno de

que poseen para desprenderse de un electrón. Los resultados se expresan a través de un gráfico llamado voltamperograma (Fig.5).

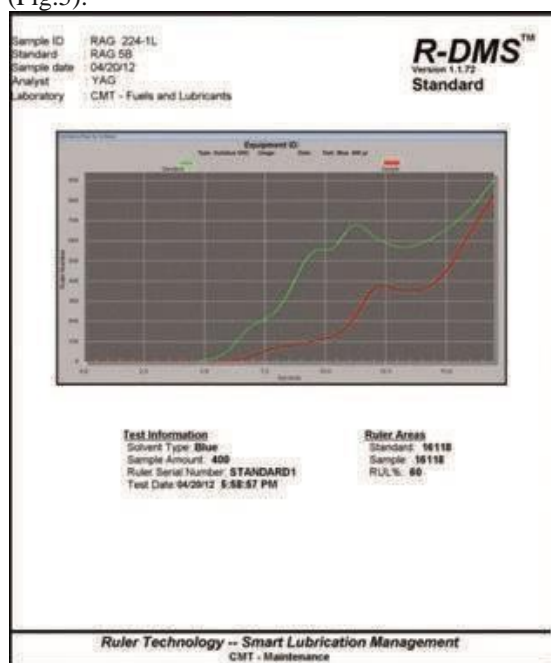


Figura 5: Voltamperograma de un aceite lubricante

El número RUL se reporta como la diferencia en términos de % del área del voltamperograma de la muestra de referencia y la analizada.

En el caso de los MCIA, los aditivos antioxidantes que suelen identificarse por medio de esta técnica corresponde a los grupos amínicos y ZDDP, los cuales presentan unos tiempo de oxidación entre 7 – 9 segundos para los aditivos de tipo amínicos y de 11 – 12 segundos los ZDDP (Figura 6). Los aditivos antioxidantes de tipo fenólicos son muy difíciles de detectar y además suelen confundirse con el ruido de fondo de la corriente ¹⁴⁻¹⁷.

2.2. CARACTERÍSTICAS DE LOS VEHÍCULOS Y ACEITES LUBRICANTES

Todas las muestras analizadas proceden de 15 vehículos que operan en una flota de transporte urbano con motores

	Antioxidantes (Número de RUL) (AO)
Metodología	CMT-0091.11 (*)
Técnica analítica	Voltamperometría

un lubricante aplicando un potencial positivo entre unos rangos de potencial (0,0 - 1,7 V) y velocidades de 0,1 V/s para oxidarlos. La oxidación de los AO se producirá en función de su potencial de oxidación (E_{ox}), definido como la facilidad

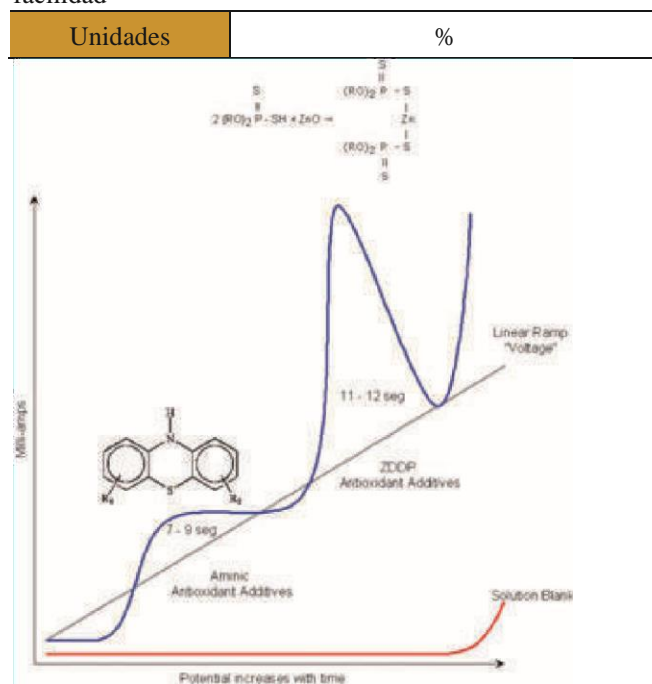


Fig. 6: Aditivos antioxidantes típicos en aceites de motor

GNC y diesel, con el fin contrastar los resultados obtenidos de una tecnología frente a otra. Este tipo de motores soportan lo que se denomina un tipo de servicio severo, debido a sus constantes paradas y arranques, largos periodos de trabajo al ralentí y una velocidad media comercial de 12,7 km/h. Los vehículos son operados en dos turnos de 8 horas. La ciudad donde se han llevado a cabo las pruebas es totalmente llana y no se pueden asociar diferencias sustanciales asociadas a la ruta efectuada.

Con el fin de contar con un mejor análisis de los resultados obtenidos, todos los vehículos mantuvieron las mismas condiciones de operación (rutas de servicio) durante todo el tiempo del estudio.

Las características principales de los motores de los vehículos y los aceites lubricantes son presentadas en la Tabla 4 y 5.

Características	Motores GNC	Motores Diesel
Tipo	Inyección Indirecta / Turboalimentado	Inyección Directa / Turboalimentado
Numero de cilindros	6	6
Diámetro / Carrera (mm)	115 / 125	128 / 155

Cilindrada (cc)	7.790	11.967
Potencia CV	270 @ 2.000 rpm	220@ 1.900 rpm
pme (bar)	15,4	11,6
Periodo de servicio (km)	30.000	30.000

Volumen del carter (l)	23	31
OSF (kWkm/l ²)	33.488	20.756
Tipo de aceite lubricante	I y II	III

Tabla 3: Metodologías aplicadas para los ensayos de número de RUL

*) Designación correspondiente a metodologías internas del CMT. CMT-0091.11 está basada en la normativa ASTM D 6810 Standard Test Method for Measurement of Hindered Phenolic Antioxidant Content in Non-Zinc Turbine Oils by Linear Sweep voltammetry, y la normativa ASTM D 6971 Standard Test Method for Measurement of Hindered phenolic and Aromatic Amine Antioxidant Content in Non-zinc Turbine Oils by Linear Sweep voltammetry

Todos los vehículos utilizaron aceites de tipo mineral cuyas características de son presentadas en la Tabla 5.

Todas las muestras (250) se tomaron con recipiente nuevos de 125 ml con un periodo de 5.000 km, además de tomar muestras al final del periodo de servicio. Las muestras fueron extraídas desde el cárter por medio de una bomba manual “Vampire”, que contaba con un recipiente previamente etiquetado y un tubo nuevo flexible de poliuretano (PUR) para cada una de las muestras. Los recipientes se rellenaron con aproximadamente 100 ml de muestra, de manera que posteriormente pudiera realizarse una agitación intensa antes de realizar cualquier tipo de medida. Las muestras que fueron tomadas al finalizar el periodo de servicio, eran tomadas por personal técnico de la empresa de transporte, que rellenaban un recipiente directamente con el aceite que se drena, tras dejar fluir al menos tres segundos el aceite antes de tomar la muestra.

3. RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados obtenidos en campo, en función de las variables analizadas.

3.1. RESULTADOS DE LOS NIVELES DE TAN / TBN

Las Figs. 7 y 8, muestran la evolución de las medidas de acidez y del agotamiento de la reserva alcalina en mg KOH/g de las muestras analizadas para los motores GNC y diesel respectivamente.

Tabla 4: Características principales de los motores

Podemos inferir en primera instancia que la intersección de las curvas de tendencia de las medidas de TAN y TBN, muestran los periodos de servicio para cada uno de los aceites lubricantes. Como podemos observar el aceite tipo II, muestra una clara reducción del periodo establecido hasta un 50% aproximadamente (15.000 km). Alcanzar los periodos de servicio establecidos por el fabricante (30.000 km) utilizando esta formulación podría suponer graves riesgos de

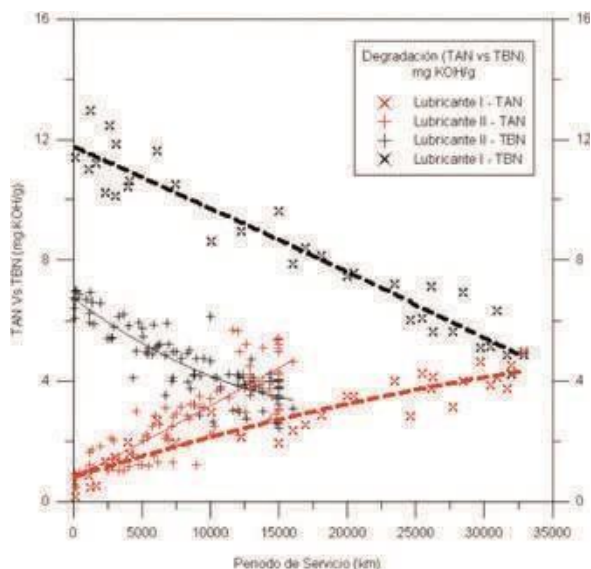


Fig. 7: Comparativa TAN/TBN en motores GNC

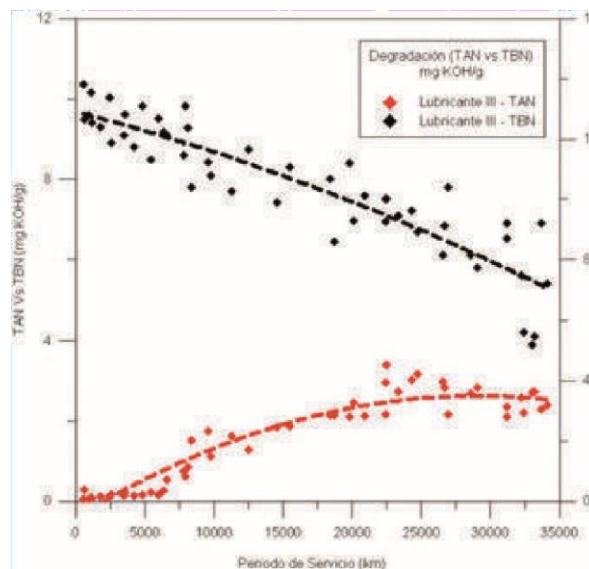


Fig. 8: Comparativa TAN/TBN en motores Diesel

Características	Tipo I	Tipo II	Tipo III
Grado SAE	10W40	15W/40	15W/40
Densidad a 15°C (kg/m ³)	865	885	881
Viscosidad a 40°C (cSt)	91,8	112,0	108,0
Viscosidad a 100°C (cSt)	14,3	14,5	14,5
Índice de Viscosidad	160	125 min.	130 min.
T.B.N. (mg KOH/g)	13,2	7,0	10
Aditivos amínicos (Abs cm ⁻¹ /0.1mm)	17.991*	12.978*	1.275*
Antidesgaste (Abs cm ⁻¹ /0.1mm)	8.048*	10.903*	12.950*
Punto de infl amación, vaso abierto (°C)	> 220	215	215 min.
Pour point (°C)	< -33	-27	-27 max
Especificaciones	IVECO 18-1809	API CF-4	ACEA E7/E5, API CI-4/CH-4/SL

Tabla 5: Características principales de los aceites lubricantes

(*) Estos resultados corresponden a medidas realizadas en el laboratorio por medio de la técnica de FT-IR

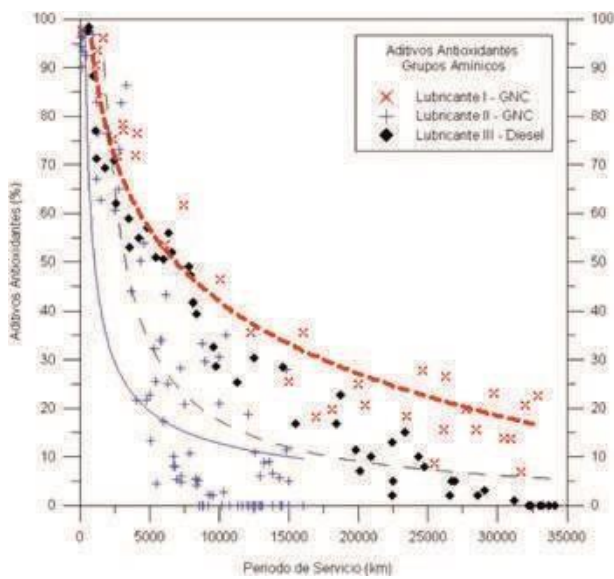


Fig.9: Evolución de los aditivos de tipo amínicos por FT-IR

fallo en el motor. Se puede atribuir el mejor comportamiento que presenta la formulación I frente al tipo II, a sus paquetes de aditivos y muy seguramente a su base lubricante.

Cabe destacar que la formulación I cuenta con niveles superiores de TBN que el tipo II, permitiendo de esta manera neutralizar los elevados niveles de acidificación del aceite al final del periodo de servicio. Los motores diesel, muestran sin lugar a dudas, una menor exigencia desde el punto de vista de la acidez del aceite, viéndose muy poco afectados por esta variable. Su reserva alcalina alcanza sin ningún tipo de problema los periodos que se ha establecido para estos motores pudiendo alcanzar niveles superiores si hiciéramos una extrapolación de los datos obtenidos.

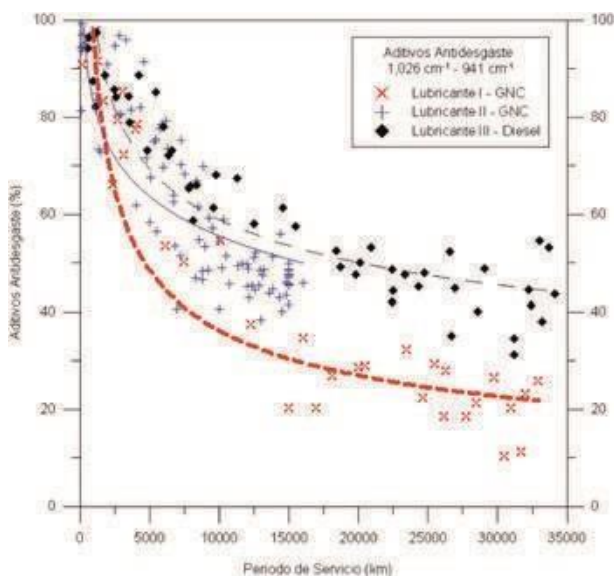


Fig. 10: Evolución de los aditivos antidesgaste por FT-IR

3.2. RESULTADOS DE LOS PAQUETES DE ADITIVOS POR FT-IR Y VOLTAMPEROMETRÍA

Las Figs. 9 y 10, presentan el comportamiento de los paquetes aditivos antioxidantes amínicos y antidesgaste para las dos tipologías de motores, a través de la técnica de FTIR. La Figura 9 muestra una marcada diferencia entre las tasas de agotamiento en los aceites lubricantes tipo I y II, lo que evidencia una mayor resistencia de la formulación tipo I frente a las solicitaciones dadas por el motor, además de contar con mayores concentraciones en sus paquetes de aditivos antioxidante de tipo amínico como se puede observar en la Tabla 5. Los aditivos antidesgaste, representados en la Fig. 10, muestran un mayor consumo en los motores

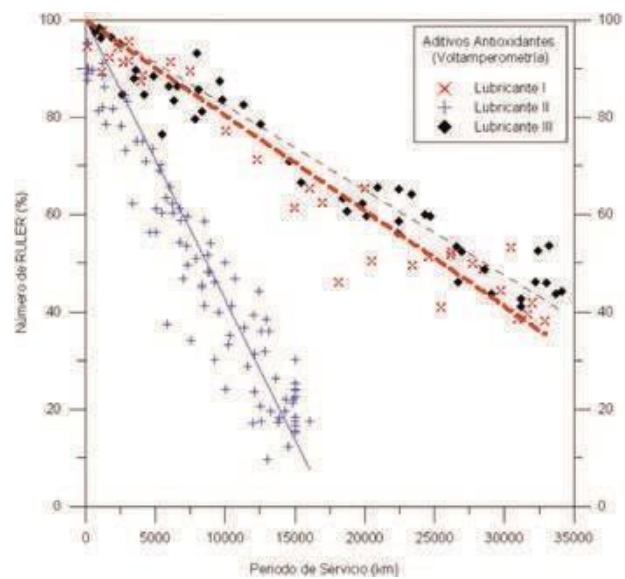
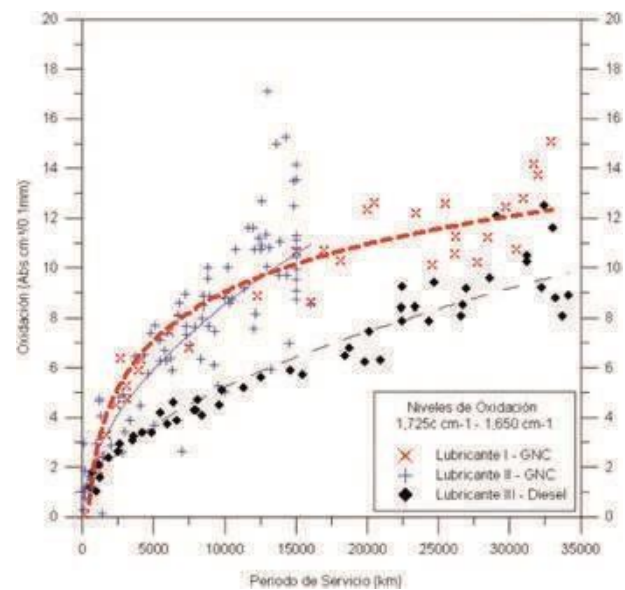


Fig.11: Evolución de los aditivos antioxidantes por Voltamperometría



Tamarit

Fig. 12: Evolución de los niveles de oxidación mediante FT-IR GNC, como una consecuencia del posible desgaste que puedan estar sufriendo estas configuraciones de motor, así como contar con menores concentraciones de este tipo de aditivos en su formulación. Los motores diesel siguen presentando al igual que los consumos de la reserva alcalina un mejor comportamiento frente a las condiciones de operación del motor.

Las medidas de los paquetes de aditivos antioxidantes por medio de la técnica de voltamperometría lineal de barrido, que involucra no solo aquellos aditivos de tipo amínico, sino también los de tipo ZDDP como se ha expuesto previamente, siguen manteniendo un comportamiento similar al observado en las medidas por FT-IR, como podemos observar en la Fig. 11.

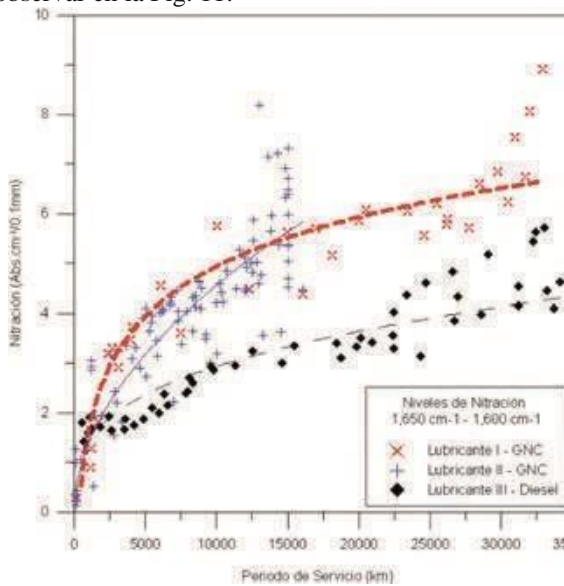
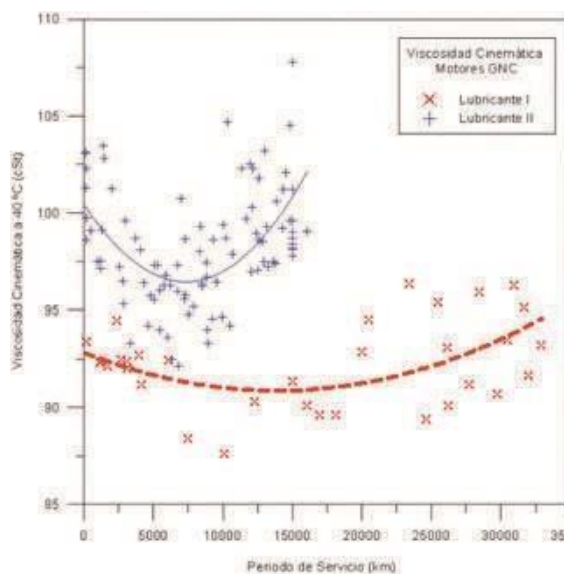


Fig.13: Evolución de los niveles de nitración mediante FT-IR



3.3. RESULTADOS DE LOS NIVELES DE OXIDACIÓN Y NITRACIÓN POR FT-IT

Como se puede observar en las Fig.s 12 y 13, los resultados obtenidos para los niveles de oxidación y nitración, tomando como punto comparativo 15.000 km, presenta mayores niveles de degradación en los motores de GNC frente a los motores diesel, como una consecuencia directa de la elevada sollicitación a la que están sometidos los aceites lubricantes en esta configuración de motores y sobre todo al agotamiento que presentan sus paquetes de aditivos. Se llegan a obtener valores similares de oxidación y nitración para el lubricante II respecto al I, cuando su periodo de servicio se encuentra a un 50% (15.000 km) del recomendado por

Fig. 14: Evolución de la viscosidad cinemática en motores GNC el fabricante. En todos los casos, los niveles de oxidación y nitración mantienen una correlación lineal en función del agotamiento de los paquetes de aditivos antioxidantes como se ha podido comprobar en otros estudios ⁴.

3.4. RESULTADOS DE VISCOSIDAD CINEMÁTICA

Los resultados para la viscosidad cinemática a 40 °C se presentan en la Figura 14 y 15 para los motores GNC y diesel respectivamente. La evolución de las muestras de los motores de GNC se puede dividir en dos partes: inicialmente hay una reducción en el valor de la viscosidad, relacionado con el efecto de cizallamiento de los aditivos mejoradores del índice de viscosidad, sin embargo, después de este período inicial hay una tendencia creciente en las mediciones de viscosidad, hasta tal punto de obtener valores en el período de cambio muy similares a los del aceite nuevo como consecuencia del proceso de oxidación del aceite (especies con un alto peso molecular) que es la principal causa del espesamiento del aceite ¹⁸. En el caso de los motores diesel, presentan una evolución típica de esta variable en función del periodo de servicio en aceites multigrado, donde se observa una clara reducción en los valores de la viscosidad como consecuencia de los efectos del cizallamiento ^{5, 19}.

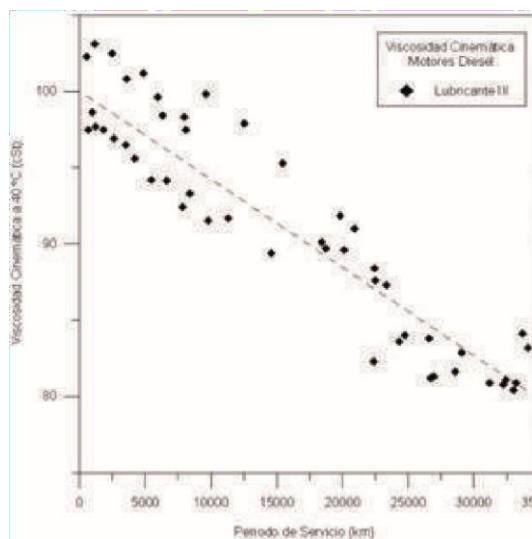


Fig. 15: Evolución de la viscosidad cinemática en motores diesel

Tras haber analizado el comportamiento de la degradación mediante distintas técnicas analíticas en motores GNC y diesel, se procedió a realizar un pequeño análisis de los resultados de la cuantificación del desgaste del motor a través de la técnica de espectroscopía de emisión óptica de plasma acoplado inductivamente (ICP-OES), como se puede observar en la Fig. 16. Estos análisis fueron llevados a cabo en un laboratorio externo que presta dicho servicio al operador de los vehículos. En esta figura se representaron los niveles de desgaste de aquellos metales que presentaron mayores concentraciones e incidencias dentro del proceso de degradación del aceite en motores GNC que utilizaban del aceite tipo II. El cobre, hierro y plomo además de contar con concentraciones bastante apreciables, tienen la facilidad de interactuar como catalizadores durante el proceso de degradación oxidativa de los aceites lubricantes en motores de combustión interna, siendo el cobre sin lugar a duda uno de los catalizadores más influyentes dentro del proceso de degradación oxidativa^{6 18}. Los valores típicos que podrían llegar a obtenerse en condiciones extremas como las presentadas en este estudio estarán alrededor de las 80 ppm de Cu.

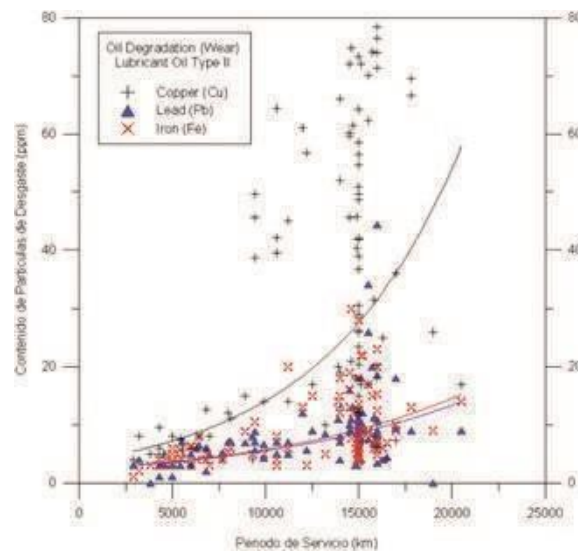


Figura 16: Evolución de los metales de desgaste en motores GNC por medio de las técnica ICP-OES

4. CONCLUSIONES

Los motores GNC muestran mayores exigencias térmicas que los motores diesel, y por consiguiente, requieren de formulaciones específicas de sus aceites lubricantes, para cumplir con los periodos de servicio recomendados por los fabricantes. Utilizar formulaciones que presenten bajas configuraciones en sus paquetes de aditivos, como la formulación tipo II, puede impedir alcanzar los periodos de servicio establecidos por los fabricantes, ocasionando mayores operaciones de mantenimiento y por consiguiente mayores costes.

El análisis de los metales de desgaste, y en especial del Cu, Pb y Fe, deben ser considerados en el diagnóstico de los motores de GNC y diesel como uno de los parámetros principales a controlar dentro de la técnica de ICP-OES. Los altos niveles en los metales de desgaste del aceite tipo II y en especial de Cu que están en las muestras tomadas al final del periodo de servicio, obedecen en gran medida al agotamiento que ha presentado en sus paquetes de aditivos antioxidantes y antidesgaste, así como su correspondiente acidificación. Los aditivos antioxidantes de tipo amínico tienen entre otras funciones la de reducir la corrosión de metales al interactuar con otros aditivos en esta etapa final de su tiempo de uso.

Tamarit

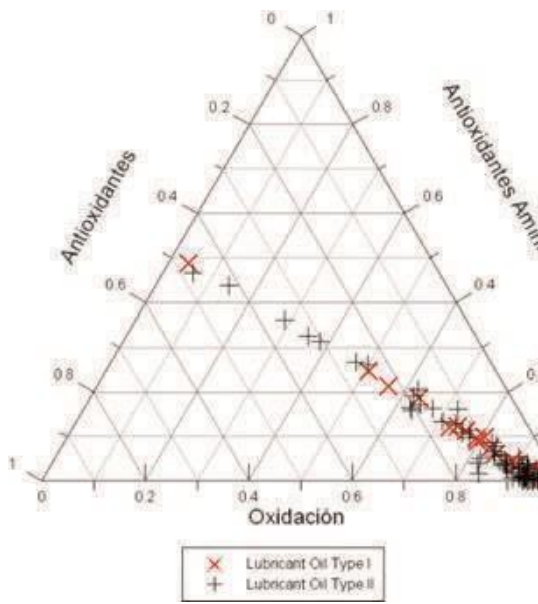


Fig. 17: Relación entre los niveles de oxidación, aditivos amínicos y antioxidantes

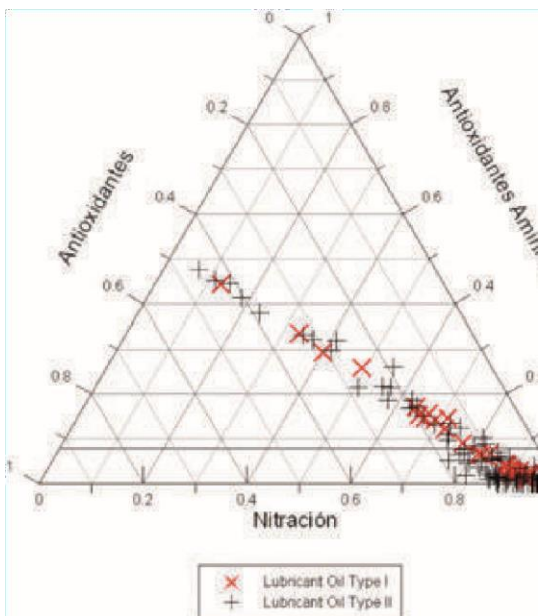


Fig. 18: Relación entre los niveles de nitración, aditivos amínicos y antioxidantes

Los resultados que se han obtenido

Tamarit

en motores GNC utilizando la formulación I, que presentan mejoras en su formulación (paquetes de aditivos y base lubricante), hace que estos puedan operar bajo condiciones más severas de servicio, permitiendo alcanzar los periodos de cambio aconsejados por los fabricantes sin poner en riesgo la vida del motor. A pesar de que el precio de la formulación I es aproximadamente 2,5 veces mayor que la formulación II, presenta mayores ventajas al cumplir con los periodos de servicio, disminuyendo los costes por inmovilizaciones y las operaciones de mantenimiento.

Se podría plantear la realización de algunas mejoras en los vehículos GNC con el fin de disminuir los altos niveles de estrés que estas configuraciones vienen presentando. Estas mejoras podrían estar enfocadas en cuanto a los volúmenes de aceite en el cárter o en cuanto a la eficiencia de los sistemas de refrigeración del aceite.

Existe una excelente correlación entre los paquetes de aditivos antioxidantes (aditivos antioxidantes y aditivos amínicos) y los niveles de oxidación y nitración, en todos los casos estudiados bajo condiciones reales de operación, como podemos ver en la figuras 17 y 18. Monitorizar una de estas variables (oxidación o nitración) a través de la técnica de FTIR y siguiendo la metodología empleada, permitirá llevar un excelente control de la degradación de los aceites lubricantes en MCIA.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren mostrar su agradecimiento al apoyo recibido desde el Ministerio de Ciencia e Innovación - Dirección General de Investigación: TRA2008-06508 (GLAUTO).

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Shakour A, et al. "Natural gas as a promising alternative fuel for passenger cars". International Journal of Environment and Sustainable Development. Vol 2, (2) pp 184–196. 2003.
- [2] S emin A, et al. "Combustion Temperature Effect of Diesel Engine Cover to Compressed Natural Gas Engine". American Journal. of Engineering and Applied Sciences 2 (1) pp 212-216. 2009.
- [3] A dril E, et al. "Comparative Study of Characteristic of Lubricant Oils in Gasoline and Compressed Natural Gas Engines". European Journal of Scientific Research, 30 (2) pp 282-293. 2009.
- [4] M acián V, et al. "Comparative Study of Engine Oil Performance on CNG/Diesel Engines on an Urban Transport Fleet". SAE Paper 2010-01-2100. DOI: <http://dx.doi.org/10.4271/2010-01-2100> . 2010.
- [5] M acián V, et al. "Oil analysis evaluation for an engines fault diagnosis system". SAE Paper 1999-01-1515. DOI: <http://dx.doi.org/10.4271/1999-01-1515> . 1999.
- [6] M acián V, et al. "Behavioural study of engine oil lubricants in gas engines used in urban transport fl eets". Conference Proceedings, Lubrication Management and Technology LUBMAT '08. 2008.
- [7] D owson D, et al. "Life Cycle Tribology: 31st LeedsLyon Tribology Symposium". Tribology and Interface Engineering. Elsevier. 2005.
- [8] T aylor R, et al. "Engine Lubricant Trends Since 1990". Engineering Tribology, pp 1-16. 2005.
- [9] C oates J. "Interpretation of infrared spectra, a practical approach. Encyclopedia of Analytical Chemistry", John Wiley & Sons Ltd, Chichester, pp. 10815–10837. 2000. DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/9780470027318.a5606>
- [10] P owell J et al. "Automated FT-IR Spectrometry for Monitoring Hydrocarbon-Based Engine Oils". Lubrication Engineering. 49, pp. 233-239. 1993.
- [11] V an de Voort F, et al. "Monitoring the Oxidation of Edible Oils by Fourier Transform Infrared Spectroscopy". Journal of the American Oil Chemists' Society. 3, pp. 243-253. 1994.
- [12] V an de Voort F, et al. "FT-IR Condition Monitoring of In-service lubricants: Ongoing Developments and Future Perspectives". Tribology Transactions. 49, pp.410-418. 2006.
- [13] U NE-EN 590:2004/2010: "Combustibles para automoción. Combustibles para motor Diesel (gasóleo). Requisitos y métodos de ensayo."
- [14] K auffman R. "Remaining useful life measurements of Diesel engine oils, hydraulic fl uids and greases using cyclic voltammetric methods", Lubrication Engineering, Vol. 51, p. 223. 1994.
- [15] K auffman R. "Rapid, portable voltammetric techniques for performing antioxidant, total acid number (TAN) and Total base number (TBN) measurements", Lubrication Engineering, Vol. 54, p. 39. 1998.
- [16] K auffman R, et al "Development of a remaining useful life of a lubricant evaluation technique, part-I, differential scanning calorimetric techniques", Lubrication Engineering, Vol. 44, p. 154. 1988.

[17] Sharma B, et al "RUL assessment of

Tamarit

lube oil using AHP and vector projection approach”, *Industrial Lubrication and Tribology*, Vol. 58 Iss: 4, pp.187 – 194. 2006

- [18] Rudnick L. *Lubricant Additives – Chemistry and Applications*. CRC Press Taylor & Francis Group. 2003, ISBN-10: 0-8247-0857-1
- [19] Macián V, et al. “Evaluation of used lubricant behaviour in industrial vehicles engines in the 1990s”. SAE Paper 2000-01-1824. DOI: <http://dx.doi.org/10.4271/2000-01-1824> . 2000.
- [20] Tormos B. “Contribución al diagnóstico de motores Diesel en basado en el análisis del lubricante usado”. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia. 2002.
- [21] Thibault R. “Converting to Condition-Based Oil Changes”. *Practicing Oil Analysis 2000 Conference Proceedings*. 2000.

Cómo seleccionar una prueba estadística (Segunda parte)

(Choosing a statistical test. [Second part])

Manuel Gómez-Gómez,* Cecilia Danglot-Banck,* Leopoldo Vega-Franco**

La prueba t de Student, en su uso más común, es la prueba de hipótesis acerca de la media de una sola población y también valoración de si las medias de dos grupos son estadísticamente diferentes entre sí, lo que tiene los siguientes supuestos: 1) las observaciones en cada grupo siguen una distribución normal; 2) la desviación estándar en ambas muestras es igual, y 3) independencia. El valor de las observaciones en un grupo no proporciona información alguna sobre el otro grupo.

Es probablemente la prueba estadística más ampliamente usada y conocida.²² Es simple, sencilla, fácil de usar y adaptable a una amplia gama de situaciones.

El análisis de varianza define las diferencias en el número de hospitalizaciones entre tres o más grupos; por ejemplo, derechohabientes en el ISSSTE, IMSS y Seguro Popular; medio socioeconómico alto, medio y bajo.²³

La prueba t de Student pareada. Ésta se usa para comparar las diferencias con relación a los promedios respecto de sí mismos, o variaciones, relacionados con el tiempo o circunstancias diferentes. Se emplea, por ejemplo, para saber si hay diferencia en el número de hospitalizaciones según el empleo de un nuevo medicamento contra la displasia broncopulmonar en pacientes, en una clínica ambulatoria, donde cada paciente

significativas en uno o más grupos categóricos. La hipótesis nula en esta prueba plantea que no existen diferencias entre las frecuencias esperadas y las observadas, es así que la χ^2 se emplea también para conocer la bondad de ajuste de las observaciones y resume si la discrepancia entre las frecuencias observadas y las esperadas es o no significativa; en cambio, la χ^2 de independencia se usa para conocer la relación entre dos variables de una muestra, y para saber si los dos factores están o no relacionados. La χ^2 usa variables nominales (categóricas) o datos ordinales, en lugar de medias y varianzas.^{3,7,8,25} En cuanto a la bondad de ajuste de la χ^2 , ésta parte de la suposición planteada en términos de que si se tira una moneda al aire 100 veces, los resultados esperados son que 50 veces sea águila y 50 sol; si a un lado de esta suposición se obtienen 47 águilas y 53 soles, tal divergencia ocurre porque ¿la moneda tiene un sesgo o es por casualidad? La *hipótesis nula* para tal experimento plantea que las frecuencias observadas son cercanas a las frecuencias esperadas. La *hipótesis alterna* es que las frecuencias no sean próximas a lo esperado, así la fórmula:

(χ^2) es una prueba cualitativa para saber si las diferencias

www.medigraphic.org.mx calculando los grados de libertad y usando tabla de distribución de χ : si la chi cuadrada calculada es mayor que _____ el de la tabla, se rechaza la hipótesis nula, concluyendo sirve como su propio control.

La hipótesis nula es que no existan diferencias en el número de admisiones con el uso del nuevo medicamento. Por otra parte, considera la variación de una prueba en un solo grupo (por ejemplo, antes y después).²⁴

La prueba estadística conocida como chi cuadrada entre las frecuencias observadas y las esperadas son o no

* Pediatra-Neonatólogo, Maestría en Ciencias con Énfasis en Epidemiología, UNAM.

** Pediatra-Gastroenterólogo, Editor de la Revista Mexicana de Pediatría.

$\chi^2 = \sum [(O-E)^2/E]$, en donde O es la frecuencia observada y E la frecuencia esperada; en tal caso, para águila: $\chi^2 = (47-50)^2/50 = 0.18$ y para sol: $\chi^2 = (53-50)^2/50 = 0.18$, por lo que la suma de estas «categorías» es $0.18 + 0.18 = 0.36$.

El significado de la bondad de ajuste se conoce calculando. Este artículo puede ser consultado en versión completa en <http://www.medigraphic.com/rmp> que las predicciones eran incorrectas (en este experimento, los grados de libertad serían $[2 - 1] = 1$). El valor crítico para

una χ^2 para este ejemplo es $\alpha = 0.05$, y $v = 1$ es 3.84, o sea que es mayor de la χ^2 estimada 0.36, lo que no rechaza la hipótesis nula y, por lo tanto, el sorteo fue justo.²⁶
 Gómez-Gómez M y cols. • *Cómo seleccionar una prueba estadística*

Es pertinente mencionar que en la prueba de χ^2 aplicada a tablas de contingencia de 2 x 2 no se calculan las frecuencias esperadas:

$$n \frac{(ad-bc)^2}{(a+c)(b+d)(a+c)(c+d)} = \chi^2$$

En general, cuando la frecuencia esperada es menor de dos en alguna de las casillas, o éstas tienen un 20% o más de cifras menores a cinco, no se debe usar la χ^2 , y en las tablas de 2 x 2 se recomienda hacer la llamada corrección de continuidad (de Yates): que consiste en restar la mitad de las diferencias entre las frecuencias observadas y las esperadas en el numerador de la χ^2 , antes de elevar al cuadrado, por lo que el valor de la χ^2 disminuye.²⁷

La prueba exacta de Fisher es, en cierta forma, semejante a la χ^2 y se usa al analizar las tablas de contingencia de dos filas y dos columnas, cuando los números en cualquier casilla de la tabla de contingencia, son < 5 .²⁸

$$p = \frac{(a+b)!(c+d)!(a+c)!(b+d)!}{a!b!c!d!n!}$$

Se hace la comparación de medias con la prueba de la suma de rangos de Wilcoxon, la cual usa la magnitud de las diferencias entre las mediciones respecto a un supuesto parámetro de ubicación; cabe agregar que esta prueba tiene los siguientes supuestos: 1) que la muestra sea aleatoria; 2) que la variable sea continua; 3) que la población se distribuya de manera simétrica alrededor de la media, y 4) que la escala de medición sea al menos de intervalos; en

para comparar dos promedios independientes usando la

www.medigraphic.org.mx (como el número de dosis de medicamentos, la edad, t de Student; esto con los siguientes supuestos: 1) que visita al Servicio de Urgencias, etc.). Es pertinente mencionar que esta prueba revela si las medianas son diferentes.²⁹

La prueba de la mediana es para probar la hipótesis nula de que dos muestras independientes fueron extraídas de poblaciones con medianas iguales.⁹

Cuando se desea comparar dos grupos en los que se ha medido una variable cuantitativa continua, cuya las dos muestras de tamaño, n y m , usadas para el análisis hayan sido extraídas de manera independiente y en forma aleatoria, de sus respectivas poblaciones; 2) que la escala de medición sea por lo menos ordinal; 3) que la variable de

distribución no es semejante a la curva normal, o bien cuando la variable en estudio es cuantitativa y discreta, la prueba U de Mann-Whitney es una buena alternativa. En la comparación de dos grupos pareados usando sus proporciones, cuando la variable es nominal, la prueba indicada es la de McNemar, que se puede usar cuando se comparan dos procedimientos para medir la misma característica o cuando se contrastan las opiniones de dos expertos.³¹

La comparación de tres o más distribuciones independientes usando la prueba de Kruskal-Wallis se usa cuando la variable no tiene una distribución semejante a la curva normal o es de tipo discreto. Esta prueba supone que hay un diseño con una variable independiente o de índole cualitativa nominal con más de dos modalidades: las que definen a los grupos por pertenecer a conjuntos diferentes y se denominan grupos independientes. Las conclusiones con esta prueba se basan en la comparación de un valor H calculado *versus* un valor H crítico, de acuerdo con si los grupos son uno grande ($n > 5$) y el otro pequeño ($K = 3, 4$ o 5 y $n < 5$).³²

La prueba de Cochran evalúa si tres o más conjuntos con frecuencias o proporciones iguales difieren significativamente entre ellos. La igualdad se fundamenta en las características relevantes de los sujetos, o bien en el hecho de que los mismos son usados en diferentes condiciones. Esta prueba es particularmente aplicable a datos de tipo categórico (en escala nominal) o bien en observaciones ordinales (o de intervalo) dicotómicas.³³ El análisis bilateral de la varianza por jerarquías de Friedman se usa siempre y cuando los datos sean medidos al menos en una escala ordinal y puedan ordenarse en una clasificación bilateral.³⁴

Si se pretende saber si existe una relación entre dos variables, se habla de una correlación, y ésta se calcula estimando su coeficiente de correlación (r), la que puede ser positiva o negativa. Cabe mencionar que la correlación positiva ocurre cuando las puntuaciones altas de una variable se asocian con puntajes altos de la otra, en tanto que una correlación negativa es cuando las puntuaciones altas de una variable están asociadas con puntuaciones bajas en

la

Es pertinente mencionar que el análisis de correlación se usa para cuantificar la magnitud o fuerza de la relación entre variables dependientes (por ejemplo, el número de admisiones) y las variables independientes

interés sea continua, y 4) si las poblaciones son diferentes, que éstas varíen solamente respecto de sus medianas.³⁰ cionar que el valor de r se encuentra siempre entre -1 y $+1$. Un valor r cerca de $+1$ indica una relación lineal positiva

fuerte, en comparación con un valor cercano a 1, lo que indica una fuerte relación lineal negativa.

La hipótesis nula es, por ejemplo, cuando no hay ninguna relación entre el número de admisiones y el número de dosis de medicamentos, donde la correlación es de $p < 0.05$, indica que el valor nulo de no relación es rechazado, aceptando la hipótesis alterna de que sí existe una relación. Es

Rev Mex Pediatr 2013; 80(2); 81-85

conveniente mencionar que el coeficiente de correlación de Pearson (paramétrico) se emplea si se puede asumir que dos variables continuas se distribuyen normalmente;³⁵ de lo contrario, se elige el coeficiente de correlación de Spearman³⁶

Cuadro 2. Flujograma para elegir la prueba estadística adecuada.
Gómez-Gómez M y cols. • *Cómo seleccionar una prueba estadística*

La regresión lineal se usa para predecir los cambios en una variable independiente (en caso de una regresión lineal simple) o varias (en caso de una regresión lineal múltiple) que pueden afectar el valor de la variable dependiente.

Para el análisis de la regresión lineal es necesario considerar que la variable dependiente sea continua y con-

Grupos	Objetivos	Distribución normal	Distribución no normal
Uno	Variables cualitativas Dos categorías (tablas de 2 x 2)	RM = Casos y controles RR = Cohorte y ensayo clínico	
	Diferentes resultados Diferentes categorías de exposición	Prueba t de Student de una muestra	
	Variables cuantitativas Dos categorías, una variable numérica	Regresión lineal simple r de Pearson r^2 = Coeficiente de correlación Regresión lineal múltiple t de Student de una muestra	> 30 casos = χ^2 < 30 casos = Exacta de Fisher
	Una variable directa y una variable indirecta	Prueba de t no pareada Prueba de t pareada ANOVA unidireccional	U de Mann-Witney r de Spearman
		Medidas repetidas	
Dos	Una variable directa y dos o más variables indirectas		
Tres o más			Wilcoxon
	Comparar un grupo con un valor hipotético		U de Mann-Withney χ^2 o prueba binomial
	No pareados		Wilcoxon Prueba exacta de Fisher (χ^2 para muestras grandes)
	Pareados		Kruskal-Wallis McNemar
	No pareados		ANOVA Prueba de χ^2
	Pareados		en bloques Q de Cochran Friedman
	Cuantificar la asociación entre dos variables		r de Spearman Coeficiente de contingencias
	Predecir el valor de otra	Regresión lineal o no lineal	Regresión no paramétrica variable medida simple logística
	Predecir el valor de varias medias o de variables	Regresión lineal o no lineal múltiple binomiales	Regresión logística

www.medigraphic.org.mx

Para el análisis de la regresión lineal es necesario

múltiple

tenga una distribución normal, en tanto que la relación entre una variable dependiente e independiente es lineal, y si tal suposición no se cumple, los resultados pueden ser incorrectos,^{2,9} mientras que para una variable independiente, no es necesario que se distribuya normalmente; sin embargo, para el análisis de correlación, ambas deben distribuirse de manera normal.

En cuanto a la regresión lineal, ésta se usa para expresar, en una ecuación, la relación que hay entre las variables dependiente e independiente; de tal manera que si estamos interesados en saber del número de visitas a un Servicio de Urgencias (variable independiente conocida como variable x), con relación al número de admisiones al hospital (variable dependiente conocida como variable y), el análisis de la regresión lineal se usa para saber su ecuación. De esta forma se estima la ecuación de la línea recta representada como $y = a + bx$, donde los coeficientes a y b son el intercepto de la línea estimada en el eje, ya que y es la pendiente.^{2,9}

En lo que atañe a la regresión logística, ésta es una variante de la regresión lineal que se usa para definir la relación que hay entre dos o más variables, cuando la variable dependiente es dicotómica y las independientes son datos categóricos o continuos;³⁷ a este respecto, en el *cuadro 2* se pueden ver las pruebas estadísticas aplicadas según el tipo de variable. Es así como se puede concluir que cuando se emplean variables cuantitativas continuas, la media aritmética y la desviación estándar de las muestras con una distribución normal, se dice que existe homogeneidad de varianzas, es decir, con varianzas similares, con un tamaño de muestra suficiente (mayor a 30 casos); en tal caso se usan las pruebas estadísticas paramétricas; pero cuando no se cumplen estos requisitos, si la distribución es anormal y el tamaño de muestra es menor a 11 casos, lo que está indicado es emplear pruebas no paramétricas o de libre distribución.

22. Lowry R. Concepts and applications of inferencial statistics. ttest for two independent samples. In: <http://faculty.vassar.edu/lowry/ch11ptl.html> (acceso_el 9 11 2012).
23. Moses LE. Statistical concepts fundamental to investigations. *NEJM* 1985; 312: 890-7.
24. Gosset WS. The probable error of mean. *Biometrika* 1908; 6: 1-25.
25. Gómez-Gómez M, Danglot-Banck C, Velásquez-Jones L. Bases para la revisión crítica de artículos médicos. *Rev Mex Pediatr* 2001; 68: 152-159.
26. Reynaga-Obregón J. *Estadística básica en ciencias de la salud*. México: Distribuidora y Editora Mexicana; 1999. pp. 37-52.
27. Daniel WW. *Bioestadística. Bases para el análisis de las ciencias de la salud*. 4ª ed. México: Editorial Limusa Wiley; 2002.
28. Mejía-Aranguré JM, Fajardo-Gutiérrez A, Gómez-Delgado A, Cuevas-Urióstegui ML, Hernández-Hernández DM, Garduño-Espinosa J et al. El tamaño de muestra: un enfoque práctico en la investigación clínica pediátrica. *Bol Med Hosp Infant Mex* 1995; 52: 381-391.
29. Sackett DL. Bias in analytic research. *J Chron Dis* 1979; 32: 51-63.
30. Álvarez-Martínez H, Pérez-Campos E. Causalidad en medicina. *Gac Med Mex* 2004; 140: 467-472.
31. Armitage P, Berry G. *Estadística para la investigación biomédica*. 3ª ed. Madrid: Harcourt Brace; 1997. pp. 145-64.
32. Dawson-Saunders B, Trapp RG. *Bioestadística médica*. 3ª ed. México: El Manual Moderno; 2002. p. 335-52.
33. Reynaga-Obregón J. *Análisis estadístico en ciencias de la salud*. México: Distribuidora y Editora Mexicana; 2001.
34. Stevens SS. On the theory of scales of measurement. *Science* 1946; 103: 677-680.
35. Hernández-Ávila M, Garrido-Latorre F, López-Moreno S. Diseño de estudios epidemiológicos. *Salud Pública Méx* 2000; 42: 144-154.
36. Velásquez-Jones L, Gómez-Gómez M. Valoración de un artículo biomédico. En: Martínez y Martínez R, editor. *Cómo escribir un texto en ciencias de la salud. Anatomía de un libro*. 2ª ed. México: Manuel Moderno; 2002. p. 93-104.
37. Soyemi K. Choosing the right statistical test. *Pediatr Rev* 2012; 33(5): e38-44.

Correspondencia:

Dr. Manuel Gómez Gómez
Parque Zoquiapan Núm. 25,
Col. Lomas del Parque, 53398,
Naucalpan, Estado de México.
Teléfono: 55 76 56 06
E-mail: mangomez@prodigy.net.mx

www.medigraphic.org.mx

Diferencia por litro de leche entre vacas mexicanas y francesas en 1932

Leche de vaca	Proteínas (g)	Grasas (g)	Lactosa (g)
México	22	34	45
Francia	36	40	47

«Como se verá, la leche de vaca de nuestro país es inferior a la leche de vaca de Francia, porque en un litro de leche existen 14 gramos menos de proteínas, 6 gramos menos de grasas y 2 gramos menos de lactosa; y si valoramos las calorías tenemos que un litro de leche de vaca en Francia produce 712.3 calorías

y un litro de leche de vaca en México produce 590.0 calorías

restando se obtiene: 122.3 calorías

¿será que una de ellas estaba «bautizada»?

Es decir, que un litro de leche de vaca en Francia posee 122.3 calorías más que el mismo volumen de leche de vaca en México; por otra parte, la diferencia por onza es la siguiente:

Una onza de leche de vaca en México, 16 calorías, y una onza de leche de vaca en Francia, 20.5 calorías.

Resultando la mexicana en 4.5 calorías inferior a la onza de leche de vaca de Francia.

Me propuse hacer el estudio comparativo anterior, porque es fundamental conocer esto para administrar el alimento adecuado a las necesidades del niño mexicano. Como veremos posteriormente, y lo tendré muy presente al comentar el método de alimentación que aún en los actuales momentos se está empleando para hacer el cálculo del alimento del niño en nuestra patria, si tenerse en cuenta la pobreza alimenticia de la leche de nuestras vacas, como continuaré demostrándolo teórica y prácticamente en los capítulos siguientes».

[Nota extraída de una de las páginas de la *Rev Mex de Pediatría*, en el volumen 2 de 1932].

MESAS DE TRABAJO ESTRUCTURA TARIFARIA

ELEMENTOS CLAVES ENTORNO A LA ESTRUCTURA TARIFARIA

Secretaría de Movilidad

Carmen Habela Rodriguez

24/01/2019

Tabla de contenido

ELEMENTOS CLAVES ENTORNO A LA ESTRUCTURA TARIFARIA	2
Situación actual del Transporte Público	2
Las tarifas en el Transporte Público	3
Estándares de Calidad del Servicio	4
Situación de la flota e infraestructura de la Empresa Pública Metropolitana de Transporte de Pasajeros de Quito	13
Sistema Integrado de Transporte	14
Acompañamiento al Sistema Integrado de Recaudo	14
Contratación del operador para implementación del SIR	15
Creación de una Autoridad Única del Transporte	15
Reestructuración de Rutas	16
Características Generales Actuales del Plan de Reestructuración de Rutas de Transporte Público de Quito	17
Características de la nueva red de TP	20
Estructura y constitución del fideicomiso	24
Propuesta de Estructura Tarifaria	25

ELEMENTOS CLAVES ENTORNO A LA ESTRUCTURA TARIFARIA

La definición de una Estructura tarifaria supone un análisis pormenorizado del sistema de transporte Público en su situación actual y en perspectiva de los fundamentales cambios que requiere. En torno a estos cambios gira la definición y aprobación de una estructura tarifaria coherente con la sustentabilidad del sistema de transporte público.

Situación actual del Transporte Público

El concepto de movilidad sostenible surge como respuesta a los impactos sociales, económicos y ambientales derivados del uso intensivo de los vehículos a motor. El vehículo privado resulta ser el medio de transporte que más suelo ocupa, más combustible consume y más externalidades genera (accidentes, contaminación, ruido, congestión, etc.). Sin embargo, desde el punto de vista de la mayoría de usuarios el vehículo privado sigue siendo altamente valorado y deseado, por encima del resto de medios de transporte. La solución de la movilidad en las ciudades debe partir de políticas que fomenten el uso del transporte público en sus diversas formas, por sobre el uso individualizado del transporte particular.

En Quito, el actual sistema de transporte constituye un sistema desintegrado, de baja calidad deservicio, que atiende a los segmentos de demanda bajo esquemas tradicionales ineficientes. Las distintas líneas de buses urbanos convencionales no se articulan adecuadamente entre sí ni con el subsistema Metrobús-Q. El sistema requiere solventar la conexión norte – sur, así como las conexiones transversales, fundamentalmente en el área urbana.

Igualmente, necesita optimizar y ampliar la red para una mejor comunicación con el área urbano-periférica. Los sistemas de transporte cubren gran parte de las áreas de demanda, pero su limitada integración produce considerables inconvenientes al momento de viajar y efectuar transferencias y transbordos. Los modos más vulnerables, peatones y no motorizados, son poco atendidos y no cuentan con una red que promueva y facilite su articulación al sistema. Esto se ve reflejado en una deficiente activación del espacio público.

Para hacer frente a esta problemática de movilidad, entre varias acciones, la Municipalidad se encuentra construyendo la Primera Línea de Metro, el mayor proyecto de obra pública de toda su historia, asignada para mejorar sustancialmente la calidad de la oferta del transporte público. Este proyecto se lo ha concebido como la columna vertebral de la red transporte público de la ciudad de Quito, operando con los demás servicios de una manera integrada, condición sin la cual no debe operar el Metro.

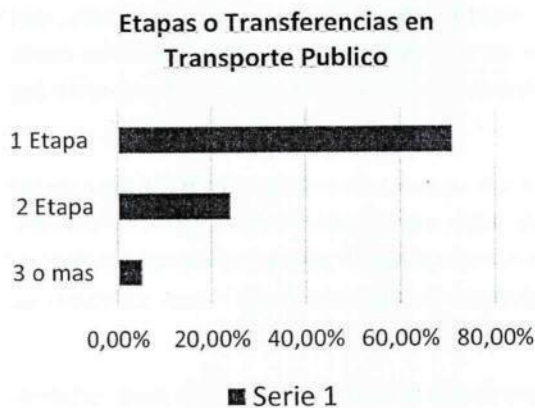
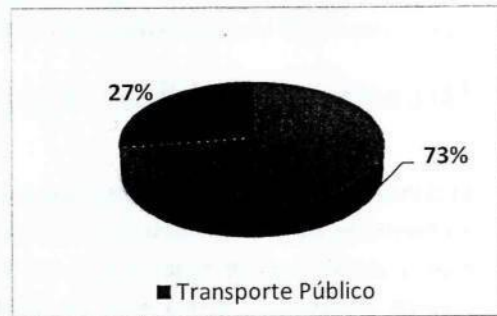
Implementar el Sistema Integrado de Transporte Público del Distrito Metropolitano de Quito (SITP-Q) es uno de los grandes objetivos de la movilidad de la Municipalidad, tarea llevada a cabo por la Secretaría de Movilidad y sus Empresa Pública Metropolitana de Transporte de Pasajeros de Quito (EPMPQ) y la empresa Pública Metropolitana Metro de Quito (EPMMQ). Para lograr este cometido se requiere de manera inobjetable diseñar e implementar plan de reestructuración de la

red de transporte público, inicialmente de la ciudad de Quito, centralidad mayor del Distrito Metropolitano de Quito (DMQ), para luego extenderse a toda su jurisdicción.

Las tarifas en el Transporte Público

Teniendo presente los estudios realizados para el Municipio de Quito en los últimos años, podríamos establecer la siguiente información. El uso del transporte público se refleja en un 73% de la población, dentro del modo de transporte motorizado, como muestra el gráfico a continuación.

Dentro del mismo, se estima que, en el subsistema convencional, se producen 1 millón 600 mil viajes en día laborable y en el subsistema Metrobus-Q, 1 millón de viajes en día laborable.



Dentro de esos viajes, hay que discriminar si son realizados en una etapa o en varias, es decir si el usuario hace transbordos desde su punto de origen a su punto de destino, conllevando el pago múltiple de la tarifa, dado que en la ciudad aún no existe un sistema integrado ni una tarifa para el mismo, situación que se describirá más adelante.

Los viajes realizados en el transporte público son mayormente realizados en una etapa, suponiendo el 70% del total de viajes en el transporte público, frente al 30 % de la población usuaria, que utiliza dos o más modos de transporte para trasladarse de su origen a su destino.

Para tener en cuenta la tarifa promedio que paga la población, podremos calcular teniendo en cuenta los datos anteriormente mencionados y teniendo presente la situación de transporte informal, situación de la cual no hay mucha información, no se han realizado estudios en el seno de esta Secretaría y debemos contemplar que es difícil estudiar la informalidad, ya que como su propio nombre indica conlleva improvisación, aunque hay ciertos datos y conocimiento de diferentes casos, rutas o modos de transporte informal que se dan en la ciudad, respondiendo en la mayoría de los casos a la asistencia desde y hacia barrios periféricos de la ciudad y en lo que se denomina *última milla*¹, cuestiones que se proyectan resolver con la reestructuración de rutas en ejecución. Para valorar el transporte informal, hemos tenido presente un documento, *Transporte*

¹ La parte de las redes que conecta los usuarios finales (residenciales) a las redes del transporte público. A esta red de acceso, está muy extendido denominarla la "última milla"

Informal en Quito: movilidad desde las periferias realizado por la Universidad San Francisco de Quito. En este transporte informal, debemos tener presente que hay dos tipos, principalmente, según sea servicio privado transporte grupal, que es hacia el que se ha dirigido el estudio mencionado. Este tipo de transporte supone un costo menor ya que es compartido y suele tener paradas predeterminadas. Y dentro de la muestra trabajada, desagregan este servicio en 3 tipos de destino: Desde o hacia el hipercentro / Conexión con transporte público / Conexiones periféricas entre sur-norte y los valles.

Teniendo en cuenta la tarifa actual, 0, 25 ctvs., la valor promedio ponderado del pago en el uso del transporte público, según los datos de estudios, es 0, 34 ctvs.

Por otro lado, el valor pagado en el transporte informal, de los valores conocidos, fluctúa entre 0, 50 y 1, 50, por lo que podríamos considerar de manera general un valor de 0,75 ctvs. Sin embargo, no podemos hacer un cálculo más preciso, ya que no se dispone de una información fidedigna y completa del transporte informal.

Actualmente el DMQ cuenta con la misma tarifa desde hace dieciséis años, situación que es totalmente insostenible. La población de la ciudad de Quito en 2003, era según censo de 2001, 1.39 millones con una tasa de crecimiento de 1.55% hasta 2010, con 1.6 millones de habitantes. En 2018 y proyecciones a 2020, donde la tasa de crecimiento se supera con respecto a la década anterior, con 1'98 millones de habitantes, el área urbana en 2018.

Por lo tanto, el mayor requerimiento de servicio público y el aumento de los costos operacionales; no ha venido acompañada de una tarifa adecuada que permita equilibrio financiero para las operadoras privadas y para la Empresa Pública Metropolitana de Transporte de Pasajeros de Quito, lo que ha conllevado a la necesidad de cubrir dichos déficits mediante subsidios y ha incidido en la baja de la calidad del servicio.

Adicionalmente, es meritorio observar que la tarifa en 2003, de 0, 25 ctvs. frente al salario base de aquel momento, 122 USD, equivalía al 0.2%, en tanto que actualmente, la tarifa propuesta, de 0,70 ctvs. representa el 0.17 % del salario básico unificado actual de 394 USD. Con lo cual la tarifa propuesta, con uso de varias etapas representa un valor real inferior de lo que suponía la tarifa de 0, 25 en 2003.

En base a los elementos señalados y considerando el costo de la operación de los subsistemas, la Secretaría de Movilidad ha efectuado una propuesta de estructura tarifaria, teniendo en cuenta los estudios previos realizados, que concluye en el valor de 0, 45 ctvs., cuando se realice el viaje usando un sólo subsistema y 0, 70 ctvs., realizando un viaje en varios modos de transporte, y haciendo dos o más transferencias, durante un periodo de 90 minutos.

De ahí la necesidad de aprobar la estructura tarifaria propuesta, que mejore la situación del Transporte Público de Quito y ponga las bases adecuadas para implementar los elementos necesarios para un Sistema Integrado de Transporte, que conlleva ordenamiento, tecnificación y modernización para bien de la ciudad y la inminente inserción al sistema, del subsistema Metro de Quito.

Estándares de Calidad del Servicio

La Ordenanza Metropolitana 201, de Seguridad y Convivencia Ciudadana es el marco jurídico municipal principal para la calidad del servicio en el transporte Público. En ella existen varias Disposiciones Transitorias que dictan sobre el asunto. Este cuerpo normativo, establece que deben cumplirse treinta indicadores que versan sobre la calidad del servicio, cuyo verificación y control ha sido delegada a la Agencia Metropolitana de Transito y la Secretaría de Movilidad.

Cumplimiento de las Disposiciones Transitorias Ordenanza Metropolitana 201

❖ ACCIONES

Sobre la situación de las personas con discapacidad en el DMQ, se han ejecutado las siguientes acciones:

Mediante oficio Nro. MSP-DND-2015-0023-0, de 13 de enero de 2015, la Dirección

Nacional de Discapacidades del Ministerio de Salud Pública, informa a la Secretaría de Movilidad del Municipio del Distrito Metropolitano de Quito, que en el Registro único de personas con discapacidad existen en la ciudad de Quito 43.761 personas con discapacidad. De estos, 42.887 se encuentran en el rango de edad mayores de 5 años.

Con estos antecedentes, el Concejo Metropolitano estableció la Ordenanza Metropolitana No. 054 para la fijación de la tarifa preferencial para personas con discapacidad en el Transporte público de pasajeros en el ámbito Intracantonal Urbano del DMQ., que en su parte resolutive establece lo siguiente:

Artículo 1.- En ejercicio de los principios de orden Constitucional y aquellos previstos en la Ley Orgánica de Discapacidades, se establece en diez centavos de dólar de los Estados Unidos de América (USD. 0,10) la tarifa preferencial que las personas con discapacidad deberán cancelar en la prestación del servicio de transporte público intracantonal urbano y en el Sistema Integrado de Transporte del Distrito Metropolitano de Quito, incluyendo sus troncales y alimentadores, cuya observancia será obligatoria y de fiel cumplimiento por parte de los operadores del servicio.

Con esta información La Secretaría de Movilidad en coordinación con la Empresa Pública Metropolitana de Transporte de Pasajeros de Quito, establecerá un modelo de gestión para atender los requerimientos de transportación para este tipo de usuarios, considerando el tipo de material, los puntos de origen y demanda y demás aspectos técnicos. (Adjunto Oficio No. EPMPQ-GG-974-18 de fecha 30 de julio de 2018, enviado por la Empresa de Pasajeros de Quito)

❖ ACCIONES.-

Lastimosamente el proyecto de convenio que se iba a suscribir con la Universidad San Francisco, no se pudo culminar a su debido tiempo, se tuvo que recurrir a invitar a otras Instituciones que puedan dictar estas capacitaciones como primera alternativa:

Mediante memorando No. SM-DMGM-2018-548 de noviembre de 2018, se ha solicitado que mediante Resolución Administrativa se formalice un instructivo para la Capacitación de conductores en el DMQ, tomando como base las acciones desarrolladas por la Dirección de Gestión de la Movilidad, plasmadas en el Informe Técnico No. SM-DMGM-No.051, que en su parte medular detalla:

Para el cumplimiento del objetivo, la Secretaría de Movilidad ha escogido del registro de la Agencia Nacional de Tránsito, el listado de todas las escuelas de capacitación autorizadas en la Provincia de Pichincha:

No.		CANTON	NOMBRE	TIPO
1	PICHINCHA	Quito	Escuela de Capacitación de la Universidad San Francisco de Quito.	D
2		Quito	Escuela de Capacitación para conductores Asociados-Asociados Driving School.	D
3		Tabacundo	Escuela de Capacitación del Sindicato de Choferes Profesionales 24 de Mayo.	D
4		Quito	Escuela de Capacitación del Instituto Superior Tecnológico Mayor Pedro Traversari.	D
5		Quito	Escuela de Capacitación del Instituto Superior La Cordillera.	D
6		Quito	Escuela de Capacitación del Sindicato de Choferes Profesionales de Pichincha.	D

Como contestación a las invitaciones realizadas por parte de la Secretaría de Movilidad, se recibieron las siguientes respuestas:

NOMBRE DEL INSTITUTO	NÚMERO DE INGRESO	FECHA DE INGRESO
Instituto MOVILIS	Ticket # 2018-122443	13 de agosto de 2018
Instituto Superior Tecnológico Quito	Ticket # 2018-123043	14 de agosto de 2018
Escuela de Conductores Profesionales del Instituto Tecnológico Superior " Libertad- "ECOVIAL"	Ticket # 2018-123156	14 de agosto de 2018

Con oficio No. 037-UIO-ECOVIAL-LIBERTAD del 13 de agosto de 2018, la Escuela de Conductores Profesionales ECOVIAL, realiza su propuesta de capacitación.

Con oficio del 13 de agosto de 2018, el Instituto Tecnológico Quito presenta su propuesta de capacitación.

Con oficio No. MOV-13-08-2018 del 13 de agosto de 2018 el Instituto MOVILIS, presenta su propuesta de capacitación.

Revisadas las propuestas de los tres Institutos de Capacitación individualmente por parte de la Secretaría de Movilidad y después de mantener reuniones conjuntas con los delegados de los 3 institutos, se consideró conveniente unificar las propuestas técnicas y presentar una propuesta única, lo que permitiría a los conductores y a las operadoras, optar por cualquiera de los institutos;

de igual manera se facilita la tarea fiscalizadora de la Secretaría de Movilidad para hacer el seguimiento al cumplimiento de los programas de capacitación.

❖ **ACCIONES:**

Mediante Resolución No, SM-001-2018 de fecha 23 de febrero de 2018, la Secretaría de Movilidad emitió el “Instructivo para la Ejecución del Plan de Retribución a la mejor de la calidad en la prestación del Servicio de Transporte Público de Pasajeros del DMQ”, en el cual se detallan todos los aspectos que el Ente encargado del Control del Tránsito y Transporte del Municipio (AMT) debe ejecutar en sus operativos de fiscalización, evaluación y calificación de las operadoras de transporte público del DMQ.

A continuación se detallan los Indicadores de la Calidad del Servicio, definidos en la Resolución C024 y la Resolución N°SM-001-2018:

INDICADORES DE CALIDAD DEL SERVICIO DE TRANSPORTE PÚBLICO DE PASAJEROS - DMQ					
EVALUACIÓN DEL ÍNDICE DE LA CALIDAD DEL SERVICIO (ICS)					
No.	Parámetros	Aspectos Generales	No.	Aspectos Individuales	Calificación %
1	Estado físico de la unidad (15%)	Unidad en excelente estado	1	Carrocería y pintura	1,50%
			2	Ventanas y/o parabrisas	1,50%
			3	Asientos	1,00%
			4	Conjunto óptico (luces)	0,50%
			5	Brazos limpia parabrisas	0,50%
			6	Limpieza externa e interna de la unidad	1,00%
			7	Cintas retroreflectivas	2,00%
			8	Identificación de la unidad	2,00%
			9	Llantas en buen estado (labrado mínimo 1.6mm)	5,00%
2	Trato y Servicio al usuario (40%)	Excelente comportamiento del personal operativo	10	Excelente trato al usuario: cordialidad, amabilidad, respeto, atención personalizada, cortesía y conducción de la unidad observando normas de tránsito y señalización	5,00%
			11	Personal operativo no maltrata de obra o de palabra a ninguna persona	5,00%

INDICADORES DE CALIDAD DEL SERVICIO DE TRANSPORTE PÚBLICO DE PASAJEROS - DMQ

EVALUACIÓN DEL ÍNDICE DE LA CALIDAD DEL SERVICIO (ICS)

		Seguridad al transportar pasajeros	12	Personal operativo bien presentado uniformado e identificado	3,00%		
			13	Unidad circula con puertas cerradas	5,00%		
			14	Conductor no hace uso de objetos que distraen su función mientras conduce	2,00%		
		Control de capacidad	15	Respeto el límite de capacidad de pasajeros en la unidad y no desborda en estribos, pisaderas o colgados	5,00%		
			Respeto a límites de velocidad	16	Respeto los límites de velocidad de conformidad con la ley	5,50%	
		17		Marcador de velocidad funcionando	0,50%		
		Respeto a usuarios con movilidad reducida	18	Espacio o área adecuada y sin obstáculos para personas con movilidad reducida acorde a las normas técnicas aplicables de acuerdo al ámbito de operación	5,00%		
			19	Señalética clara y visible en el espacio o área adecuada para usuarios de movilidad reducida	4,00%		
		3	Estándares de operación (35%)	Eficiencia y cumplimiento de los índices operacionales	20	Horarios de inicio y cierre de operaciones	2,00%
					21	Flota autorizada	2,00%
					22	Ruta	2,00%
					23	Intervalos y frecuencias de operación	1,00%
24	Eficiencia administrativa y caja común				15,00%		
Información al usuario	25			Origen y destino mediante carteleras y rótulos	3,00%		
	26			Información sobre: rutas, horarios de operación, paradas y capacidad de la unidad	4,00%		

INDICADORES DE CALIDAD DEL SERVICIO DE TRANSPORTE PÚBLICO DE PASAJEROS - DMQ**EVALUACIÓN DEL ÍNDICE DE LA CALIDAD DEL SERVICIO (ICS)**

			27	Sistema de información auditivo	2,00%
		Respeto a paradas	28	Respeto a paradas establecidas para el embarque y desembarque de pasajeros	4,00%
4	Estándares ambientales (10%)	Control de opacidad	29	Límites permisibles de opacidad de conformidad con la normativa	3,00%
			30	Respeto a la configuración del tubo de escape de conformidad con la normativa	7,00%
TOTAL					100,00%

Gestión operativa.-

Para el cumplimiento de las actividades de fiscalización de transporte público, la AMT estableció y capacitó grupos de trabajo que están conformados de la siguiente manera:

Fiscalización en despacho:

Equipo conformado por 6 brigadas operativas que verifican el cumplimiento de indicadores de calidad de servicio, en los orígenes de las rutas de cada operadora de transporte público, cumpliendo las siguientes funciones:

Planificación de actividades de fiscalización y control a unidades de transporte público.

Elaboración de cronograma de fiscalización a cada unidad, por operadora; tomando en consideración el listado emitido por la Secretaría de Movilidad.

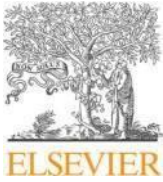
Cumplimiento estricto del cronograma interno.

Asistencia a cada lugar de despacho de las rutas, para el levantamiento y registro de las observaciones y novedades detectadas en la fiscalización, en los formularios de campo, donde se registran el cumplimiento o no de los parámetros definidos.

El equipo de fiscalización en despacho, en el marco de sus competencias, revisó los siguientes parámetros técnicos:

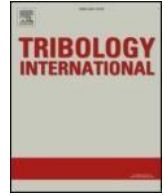
Índices operacionales.-

- Horarios de operación (inicio y fin).
- Flota
- Frecuencia



Contents lists available at ScienceDirect

Tribology International

journal homepage: www.elsevier.com/locate/triboint

Predicting condition based on oil analysis – A case study

Hugo Raposo^{a,1}, José Torres Farinha^a, Inácio Fonseca^a, Diego Galar^b

^a Coimbra University-UC, Department of Mechanical Engineering, Centre for Mechanical Engineering, Materials and Processes (CEMMPRE), Coimbra, Portugal ^b Luleå University of Technology-LTU, Department of Civil, Environmental and Natural Resources Engineering, Luleå, Sweden.

ARTICLE INFO

Keywords:

Condition monitoring
Predictive maintenance
Oil analysis
Time series t-
Student Diesel
engines

ABSTRACT

The paper presents and discusses a model for condition monitoring. Using data from the oil in the Diesel engines of a fleet of urban buses, it studies the evolution of degradation and develops a predictive maintenance policy for oil replacement. Based on the analysis of the oil condition, the intervals of oil replacement can be expanded, allowing increased availability. The paper links time series forecasting with the statistical behavior of some oil effluents, like soot. This exercise can be expanded to include other variables, and the model has the potential to be applied to other physical assets to achieve the best availability based on a condition monitoring policy.

1. Introduction

Public transport, especially the city bus system, is an important alternative to individual transport. Arguments for the use of public transit frequently center on cost, availability, and environmental impact. Transit companies, therefore, have an obvious interest in monitoring their performance to lower costs and increase availability. This paper presents a condition monitoring approach to the analysis of lubricating oils used in buses' Diesel engines. The objective is to increase buses' availability.

Condition based maintenance (CBM) was proposed in the 1970–80s as a new approach to planned maintenance based on the knowledge of the state of equipment using condition monitoring techniques [1]. In CBM, the equipment state is generally monitored continuously [2]. As Pinto [3] points out, the implementation of a condition monitoring system requires investment in equipment, specialized human resources and specific know-how. These systems are now supported by computer tools that enable the analysis, study, recording and control of the data obtained, as well as the establishment of fault trend curves.

In condition monitoring, when a reading is higher than a pre-set critical level, the equipment monitored is declared faulty and a maintenance intervention is triggered. However, in both practice and theory, little attention has been paid to whether the critical level and the monitoring interval are set in a cost-effective way [4]. Maintenance in general and condition monitoring in particular aim to combine increased reliability (and hence availability) with the lowest costs possible, whether direct or indirect.

Ahmad and Kamaruddin [5] say that in condition-based maintenance, instead of planned maintenance interventions at fixed intervals (systematic maintenance), interventions are based on the equipment condition, and CBM focuses on each piece of equipment individually. Today, monitoring is done by sensors with on-line readings, and intervention times are based on predictions of fault.

Condition monitoring may lead to the following benefits:

- Increased availability of equipment;
 - Increased safety of the machine operator;
 - Reduced maintenance costs;
 - Greater efficiency in the management of physical assets, allowing production to be adjusted to the real availability and guarantying the appropriate quality;
 - Increased capacity to dialogue with equipment manufacturers and maintenance suppliers, based on the knowledge obtained from the condition monitoring;
 - Improved relations with customers because of reduced unplanned production stoppages and increased quality;
 - Improved specifications and design of physical assets.
- Condition monitoring techniques include the following:
- Vibration analysis;
 - Thermography;
 - Analysis of performance parameters;
 - Visual inspection;

¹ Corresponding author.

- Ultrasonic measurements;
- Analysis of service lubricants;
- Electrical parameters.

In our case study, we monitored the evolution of lubricant degradation in three well defined phases:

E-mail addresses: hugo.raposo@isec.pt (H. Raposo), torres.farinha@dem.uc.pt (J.T. Farinha), inaciosaf@gmail.com (I. Fonseca), diego.galar@ltu.se (D. Galar).

<https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.01.041>

Received 20 September 2018; Received in revised form 17 January 2019; Accepted 26 January 2019 Available online 13 February 2019 0301-679X/ © 2019 Elsevier Ltd. All rights reserved.

- 1) First, the vehicles under analysis were monitored, as was the evolution of oil degradation. This monitoring was done by periodic sampling of lubricants by specialized companies;
- 2) Second, we analyzed the results and forecast future values based on specific algorithms;
- 3) Third, we developed a forecasting method based on time series and statistical analysis.

The paper is structured as follows:

- Section 2 describes the state of the art condition based maintenance for oil;
 - Section 3 presents an approach to predictive condition monitoring using oil analysis;
 - Section 4 explains the approach and proposes a model to predict faults;
 - Section 5 presents the conclusions.
2. State of art of CBM for lubricant

Lubrication is a fundamental task in condition based maintenance. Lubricant analysis is useful for any critical equipment. Through such analysis, the maintenance manager can acquire valuable information about equipment operating conditions.

While it is useful to know the current condition of equipment, many authors propose mathematical models and concepts for prediction: [1,6–24]. EN 13306:2007 [15] defines predictive maintenance as “condition based maintenance carried out following a forecast derived from the analysis and evaluation of the significant parameters of the degradation of the item”. Mobley [16] defines predictive maintenance as a regular monitoring of the current state of mechanical conditions, operating efficiency, and other indicators that provide data to determine the maximum interval between interventions to minimize the cost and the number of unscheduled stoppages. Brown [17] explains that predictive maintenance compares the trend of measurements of some physical parameters (vibration, pressure, current, temperature, ...) with the limits established for these parameters in order to analyze, predict and correct problems before failure.

According to Lima and Sales [18], the adoption of a predictive maintenance policy implies the ability to define and classify the criticality of each physical asset for its production function. Otani and Machado [19] argue that predictive maintenance guarantees the desired quality of service, based on systematic application of certain analysis techniques, using centralized or sampling means, to minimize preventive interventions and reduce corrective maintenance.

In work on oil analysis, Macian et al. [23] show the results of a pilot project in a fleet of city buses. The main objective was to measure the influence of low viscosity oils (LVO) on fuel consumption and CO₂ emissions. The study used 39 city buses, classified according to the viscosity of the engine oil used. The vehicles travelled 60,000 km, corresponding to two oil changes. The study determined the time intervals for oil change corresponding to a required level of reliability. This monitoring of the degradation of oil increased bus safety, reduced costs and improved energy efficiency.

Cabrita and Cardoso [25] emphasize the importance of key performance indicators (KPI) in measuring equipment performance. Software programs

installed in many companies can measure several KPIs, but the user needs to pay attention to those that really add value and correspond to the company and maintenance objectives. Cabrita and Cardoso [25] add that the introduction to EN 15341:2009 [26], “Maintenance/Maintenance Key Performance Indicators (KPI)”, “... establishes that the maintenance KPIs support maintenance to achieve excellence and the use of physical assets in a competitive way. Most

of these indicators apply to all industrial plants and services (equipment, buildings, infrastructure, transportation, among others)”.

According to Ferreira [27], increasing equipment availability implies reducing the number of breakdowns, as well as the repair and inspection times: it is not enough to have reliable equipment to achieve high availability rates; maximum speed in repair, maintenance and inspection is equally important. To improve the availability and operational safety of equipment, all known failures with catastrophic consequences must be eliminated; the life of the components must be increased, because each time there is a breakdown or the components are replaced, there is an important equipment stoppage and or a loss of operational safety. Physical assets must be correctly designed and an effective and efficient maintenance must be put into operation [28].

There are several approaches to forecast the evolution of oil degradation. Newell discusses an approach based on trend analysis to maximize oil change intervals. This author considers the following common oil analysis tests and procedures: viscosity; total acid number (TAN); total base number (TBN); water content; specific gravity; particle count (visual method); spectrometric analysis; ferrographic analysis, [31]. Macián et al. [32] present an analytical approach aiming at more accurate wear determination from engine oil samples. The authors ask: “What level of wear rate is normal or abnormal for the engine studied?” To answer the question, they propose a comparative parameter Z; it takes into account both the deviation from the engine reference wear rate and the reference wear rate. The parameter also compares the current situation to the behavior of a larger population, such as all engines of the same model. The authors demonstrate the influence of oil consumption and additions to the contaminant concentration.

Vališ, Zák, and Pokora [33] concentrate on metal particles, such as iron (Fe) and lead (Pb), as potential failure indicators. They apply a linear regression model to determine a linear course of Fe and Pb particle generation. They assume a stochastic process with time dependence. The authors conclude by noting the importance of time series comparisons: Auto Regression Integrating Moving Average (ARIMA) or Auto Regression Moving Average (ARMA) methods. Changsong et al. [34] present a study based on 50 oil samples collected and analyzed in sequence covering 250 motor hours. The results show maintenance intervals can be longer and, at the same time, the cost-effectiveness maintenance ratio can be increased.

According to Macián et al. [35], the Low Viscosity Oils (LVO) are very important to reduce the fuel consumption in Internal Combustion Engines (ICE). The use of LVO may imply a different tribology behavior of the engines. The authors tested 39 buses, two different technologies and four dissimilar lubricants [35].

Macián et al. [36] presents a case study of urban buses aiming to evaluate the effect of Low Viscosity Oils (LVO) on the fuel consumption and the CO₂ emissions. They used 39 buses that ran 60,000 km during which they changed the engine oil twice. For 9 of those buses on the second round of oil changing, the effects on oil in fuel consumption and the engine performance were evaluated.

The results shown that the LVO reduces the fuel consumption and the CO₂ emissions. However, the author says that the engines must be accompanied carefully with high levels of working stress [36].

Macián et al. [37] show that LVO performs well and that oil deterioration depends on the engine technology. In the case of Compressed Natural Gas engines, it was observed that the oil degradation increases [37].

Tormos et al. [38] say that the environmental concerns imply to improve the engines technology. The authors present a tribology model tested in

laboratory. Additionally, they also present the potential of the model to predictive maintenance [38].

Some relevant topics about related works on condition monitoring and predictive maintenance based on oil analysis, in urban buses fleets, are mentioned and discussed in Refs. [39–43].

Although not the topic of this paper, multivariate statistics is also useful, because oil analysis involves several variables; an approach like this may help diagnosis of the health of diesel engines. We refer the reader to the following: [44,45and46].

3. Oil analysis

The main physical feature of lubricating oil is viscosity and its variation with temperature, given by the viscosity index and the density.

In recent years, there has been a demand for high-performance engine lubricants, especially in the aerospace and automotive industries. This has led to the development of synthetic lubricants which can be maintained at high temperatures without decomposition and have a low risk of combustion. The synthetic oils are produced using highly refined processes and sophisticated formulations. They are derived from synthetic compounds based on PAO (polyolefin, polyester, polyglycol), non-synthetic PAO, esters, alkylated naphthalene and alkylated benzene. The use of synthetic oils has become more important in areas where the use of mineral oils does not meet the required needs.

Lubricating oils can cause serious environmental problems if they are discharged indiscriminately, polluting rivers and groundwater. The improper burning of oil adds oxides and toxic gases to the atmosphere. Accordingly, the manufacturers of additives and lubricating oils have been developing products with a longer life, as this tends to reduce oil discharges along the equipment life cycle.

A key feature of lubricants is their behavior with increasing temperature. They are not used at room temperature; the temperature and pressure are often high. The oils undergo change when the temperature increases, and their degradation under operating conditions is a problem involving significant economic losses. To report certain special properties of the oil, or to improve the existing ones, especially when the lubricant is subjected to severe working conditions, chemicals are added (additives). The degradation of a lubricant is not an instantaneous process – the loss of its physicochemical properties and contamination are progressive over time and with the use of equipment along its lifetime. Lubricant degradation is affected by Ref. [6]: oxidation; viscosity variation; contamination; loss of additives (anti-corrosion, anti-wear, dispersing agents, etc.).

Today's high-performance lubricants do more than simply reduce friction and wear: they control the formation of deposits, control airborne contaminants, protect against corrosion, have a cleaning function, and maintain the proper operating temperature.

3.1. Oil analysis

Under certain conditions, a lubricant can deteriorate and no longer fulfill its intended function. It is generally a function of the length of service, system temperature, environmental conditions or the stress that it is suffering and can often be traced to the presence of dirt or water, acidity, insufficient flow, or inappropriate levels of viscosity. Any of these can cause lubricated components to malfunction. Even when the lubrication system is well designed and maintained, breakdowns can occur in the component, resulting in the deterioration of the lubricant. The deterioration can be chemical or physical, generated internally by the lubricant or by external phenomena. Physical deterioration, often called contamination, materializes as foreign matter in the lubricant, such as water, foundry sand, weld slag particles, metal shavings, dust and abrasive wear particles.

Lubricant analysis is regularly performed in some industries [7]. It involves four basic steps:

1) Obtaining a sample

- Collection of a representative sample of a lubricant, observing certain precautions such as: using clean and dry containers; taking extreme care during collection to prevent external contamination; taking samples at operating temperatures.

Table 1
Main features of lubricant I.

- Lubricant II o A multi-grade lubricant with a synthetic basis, a UHPDO (Ultra High Performance Diesel Oil) specifically designed for the lubrication of the diesel engines of high-power heavy vehicles, either atmospheric or turbocharged, operating in extreme conditions. The use of this kind of lubricant allows a considerable reduction in the fuel consumption and large intervals of oil replacement. This product follows the new specifications of ACEA E7-04 and has the following proprieties:
 - High stability of the lubricant film with the maintenance of its properties even under extreme conditions of pressure and temperature.
 - Improved detergent/dispersant capacity, ensuring the perfect cleaning of the engine through the initiation of a deposit formation.
 - Alkaline reserve of high stability during the lifetime of the lubricant;
 - Good flowability at low temperatures, facilitating cold starts.
 Source: Specific sheet of lubricant, supplier of lubricant

Properties	
Graduation SAE	10 W 40
Density at 15°C, Kg/l (D1298/D4052)	0.872
Viscosity Index (D2270)	139
Cinematic Viscosity at 40°C, mm ² /s (D445)	107.2
Cinematic Viscosity at 100°C, mm ² /s (D445)	14.5
Inflammation Point, °C (293)	197
Fluxion Point, °C (D97/D6892), Max.	-39
Basicity number, mg KOH/g (D2896)	12.5

Table 2
Main properties of lubricant II.
Source: Specific sheet of lubricant, supplier of lubricant.

Properties	
Grade SAE	10 W 40
Density at 15°C, Kg/l (D1298/D4052)	0.87
Viscosity index (D2270)	141
Cinematic viscosity at 40°C, mm ² /s (D445)	100
Cinematic viscosity at 100°C, mm ² /s (D445)	13.9
Inflammation point, °C (293)	197
Flow point, °C (D97/D6892), Max.	-36

Table 3
Periodic intervals of oil changes for vehicles.

Brand	Model	Periodic intervals
Vehicle 1		50,000 km
	X ₁	
Vehicle 2	XX ₁	15,000 km
Vehicle 2	XX ₂	15,000 km
Vehicle 2	XX ₃	15,000 km
Vehicle 2	XX ₄	15,000 km
Vehicle 2	XX ₅	15,000 km
Vehicle 3	XXX ₁	20,000 km
Vehicle 3	XXX ₂	20,000 km

2) Identifying a relevant sample.

3) Performing physical-chemical analysis:

- Degree of physical and chemical deterioration, i.e., the degree of contamination and degradation, can be evaluated using a set of standard and specialized tests, such as: measuring certain properties and comparing these with a baseline value.

- Analyses can measure several properties of the lubricant and evaluate their degradation. These include: antifreeze; appearance; fuel; content water; soot; nitration; oxidation; sulfation; viscosity; viscosity index; total base number; wear metals (Al content, Cr, Fe, Mo, Na, Ni, Pb, Si, Sn, V); particles.

- 4) Interpreting results – diagnosis.
- 5) Validating diagnosis:

- Frequency with which each lubricant ought to be checked

Table 4
Limits for the various parameters.

Characteristics of the oil		Limits (X > Danger)
Antifreeze (%)	(PE-TA.071)	0,08
Appearance (dimensionless)	(PE-TA.096)	
Fuel (%)	(PE-TA.071)	4,0
Water content (%)	(PE-TA.071)	0,2
Water content (Finacheck) (%)	(PE-5022-A1)	0,2
Soot (%)	(DIN 51452)	1,5
Nitration (ABS/cm)	(PE-TA.071)	15
Oxidation (ABS/cm)	(PE-TA.071)	15
Sulfation (ABS/cm)	(PE-TA.071)	20
TBN (mgr KOH/g)	(ASTM D-2896-07a)	30
Viscosity at 100°C (cst)	(ASTM D-445-11)	15

Wear and Contamination Metals			Limits
Content in Al (ppm)	(ASTM mod.)	D-5185-05	20
Content in Cr (ppm)	(ASTM mod.)	D-5185-05	10
Content in Cu (ppm)	(ASTM mod.)	D-5185-05	35
Content in Fe (ppm)	(ASTM mod.)	D-5185-05	90
Content in Mo (ppm)	(ASTM mod.)	D-5185-05	20
Content in Na (ppm)	(ASTM mod.)	D-5185-05	40
Content in Ni (ppm)	(ASTM mod.)	D-5185-05	20
Content in Pb (ppm)	(ASTM mod.)	D-5185-05	40
Content in Si (ppm)	(ASTM mod.)	D-5185-05	20
Content in Sn (ppm)	(ASTM mod.)	D-5185-05	15
Content in V (ppm)	(ASTM mod.)	D-5185-05	00

Particles		Limits
PQ Index (Dimensionless)	(PE-5024-A1)	110

Table 5
Application of exponential smoothing - Fe (ppm) content.

Fe Content (ppm)				
Period km	Observed value	Pred. with $\beta = 0.1$	Pred. with $\beta = 0.5$	Pred. with $\beta = 0.9$
2 451	19			
5 214	53	19.00	19.00	19.00
10 115	22	22.40	36.00	49.60
12 403	14	22.36	29.00	24.76
17 212	54	21.52	21.50	15.08
22 183	141	24.77	37.75	50.11
27 682	28	36.39	89.38	131.91

30 965	77	35.55	58.69	38.39
35 965		39.70	67.84	73.14

depends on various operational factors such as: importance of the equipment; total time of service; scale of production; security; time to failure after detection.

3.2. Lubricant degradation analysis

To model the oil variables, we used an Excel program [29,30]. We used the tools and formulae provided by this program and also developed our own. The algorithmic models were created in three phases:

- 1) In the first phase, we segregated the available data (lubricants) for

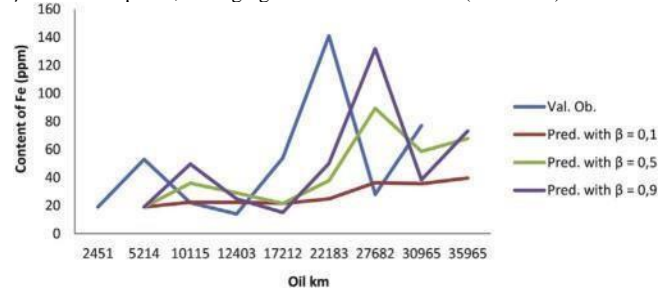


Fig. 1. Graph of exponential smoothing – Fe (ppm) content.

monitoring. These included: reports on the various lubricant analyses (variables); reference data on the lubricants (available from the laboratory doing the analyses); features and operating conditions of lubricants (supplier/brand);

- 2) In the second phase, we introduced mathematical algorithms to analyze the evolution of the variables. The algorithms are based on exponential smoothing and the t-Student statistical distribution. A smoothing parameter, β , corresponding to the history of the variable of concern is required to forecast its value in the next period [8–10].

The formula for exponential smoothing is given by:

$$S_{t+1} = \beta x_t + (1 - \beta) S_t \Leftrightarrow S_{t+1} = \beta \sum_{i=0}^t (1 - \beta)^i x_{t-i} \quad 0 \leq \beta \leq 1 \quad (1)$$

where:

S_{t+1} Is the forecast for the next time; x_t Is the real value recorded in the present time; S_t Is the forecasted value for the present time; β Is the smoothing parameter.

The formula was introduced into the spreadsheet and the forecasts were made using values for β , such as 0.1, 0.2 etc. The algorithm was applied to each variable mentioned above. We then generated line graphs representing the evolution of the degradation of the variables and predicting degradation.

In the second part of the development of algorithms for our model, we analyzed the data using the t-Student distribution, $n \leq 30$, [14].

$$\mu = \bar{X} - t_{\alpha} \times \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (2)$$

where:

μ Is a fixed value used for comparison with the sample mean; \bar{X} Is the average sample; t_{α} Corresponds to the critical T; S Is the sample standard deviation;

n Is the sample size. where t_{α} corresponds to the critical t of a tail, considering the desired confidence interval, and the degrees of freedom n-1.

Finally, we used bilateral tests of hypotheses for the value of μ : H_0 :

$\mu = \mu_0$; H_1 : $\mu \neq \mu_0$ μ is considered a random variable whose distribution for small samples ($n < 30$) is given by:

$$t = \frac{\bar{X} - \mu_0}{\frac{S}{\sqrt{n}}} \tag{3}$$

In general, σ (standard deviation of the population) is unknown. The process is the following:

Table 6
Application of t-student test to iron content - Fe (ppm).

Content Fe (ppm) t-Student	$\alpha = 0.001$	$\alpha = 0.01$	$\alpha = 0.05$	$\alpha = 0.1$	$\alpha = 0.2$
Average (sample) \bar{X}	51.00	51.00	51.00	51.00	51.00
Standard deviation (sample) S	42,35	42,35	42,35	42,35	42,35
Critical t	4.79	3.00	1.89	1.41	0.90
Standard deviation (population) σ	46.27	34.83	24.63	19.19	12.60
Population Average (μ_0)	51 + 46.2	51 + 34.8	51 + 24.6	51 + 19.1	51 + 12.6
Upper limit	97.27	85.83	75.63	70.19	63.60

Table 7

Hypothesis Test					
μ_0 (population average)	Calculated t	Table t $\alpha = 0.001$	Table t $\alpha = 0.05$	Table t $\alpha = 0.1$	Table t $\alpha = 0.2$
25.00	1.23	4.79	1.89	1.41	0.90
35.00	0.76	4.79	1.89	1.41	0.90
45.00	0.28	4.79	1.89	1.41	0.90
50.00	0.05	4.79	1.89	1.41	0.90
65.00	-0.66	4.79	1.89	1.41	0.90
75.00	-1.13	4.79	1.89	1.41	0.90
80.00	-1.59	4.79	1.89	1.41	0.90
μ_0		20.64	22.64	29.82	37.59

Table 8

Application of expo				
Soot (%)				
Period (km)	Observed value.	Pred. With $\beta = 0.1$	Pred. With $\beta = 0.5$	Pred. With $\beta = 0.9$
10000	2.30			
15000	2.00			
15000	2.90	2.30	2.30	2.30
15000	2.50	2.27	2.15	2.03
20000	2.50	2.33	2.53	2.81
25000	2.50	2.35	2.51	2.53
25000	2.50	2.36	2.51	2.50

- Lubricant I - 10 W 40 (Bus X₁, Bus XX₁, Bus XX₂, Bus XX₃, Bus XX₄, Bus XX₅);
- Lubricant II - 10 W 40 (Bus XXX₁ e Bus XXX₂).

The aim was to evaluate the impact of each mixture on the lubricant degradation and the need for maintenance. The features and conditions of the lubricants (Provider/Brand) are:

- Lubricant I o A synthetic multi-grade lubricant of exceptional quality, an EHPDO

- A one-tailed test uses one threshold value (associated with the chosen significance level) and rejects the hypothesis H₀ - where T > T critical - when the value of the modulus calculated for the t statistic exceeds the critical value.

3) The third and final stage is a different type of analysis, applying the Application of t-student test to iron content (Fe). algorithms. Once the evolution of oil degradation is established using the algorithms, the next maintenance interventions can be planned.

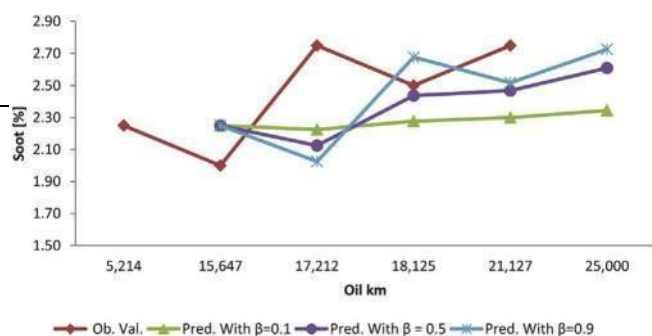
The algorithm presented here is applicable to the study of the degradation of oils; it allows the practical implementation of condition based maintenance policies, thus reducing costs, increasing availability, productivity and quality of products and services.

4. A model for fault prediction

This section explains our application of the proposed model to the evolution of oil degradation, using data from a fleet of urban buses. The application had three phases:

- 1) In the first phase, the vehicles were selected, and their oil degradation was analyzed and monitored. The monitoring involved periodic collection of oil samples from the selected vehicles; samples were sent to a specialized company to be analyzed;
- 2) The second stage involved an in-depth study of the results of the analysis using the forecasting algorithms;
- 3) In the third phase, we analyzed the existing maintenance plans and proposed improvements, based on the findings.

The buses were divided into homogeneous groups: Buses 1; Buses 2; Buses 3. While all buses use a fuel mix with 30% biodiesel, there are two types of oil mixtures:



(Extra HighPerformance Diesel Oil), especially re-

Fig. 2. Graph of the table of exponential smoothing - soot (%). commended for the lubrication of diesel engines in high-power heavy vehicles operating in severe conditions. There are very large gaps between oil changes because of the following proper-

Table 9 ties (Table 1):
Data to estimate the values of soot.

Main Data				- Good stability of the lubricant pellicle and maintenance of its properties even under heavy pressure and harsh temperature conditions.						
Average (sample) \bar{X}				2.44	- Reinforced detergent/dispersant capacity, ensuring perfect cleaning of the engine by inhibiting the formation of deposit in the segment boxes and of lacquers and varnishes in the skirts of the pistons.					
Standard deviation (sample) S				0.32	- Excellent anti-wear properties.					
α				0.01	- Low pour point, ensuring that at start-up, the oil quickly reaches					
Standard deviation (population) σ				0.67						
Population average (μ_0)				2.15	10	of t from bilateral table t-student for several values of α .				
μ_0	α	t table	t Evaluated ($X=2.44$)	Result	t Evaluated ($X=2.45$)	Result	t Evaluated ($X=2.47$)	Result	t Evaluated ($X=2.49$)	Result
2.15	0.250	1.2543	2.56	Reject H_1	2.65	Reject H_1	2.83	Reject H_1	3.01	Reject H_1
2.15	0.100	1.8946	2.56	Reject H_1	2.65	Reject H_1	2.83	Reject H_1	3.01	Reject H_1
2.15	0.050	2.2346	2.56	Reject H_1	2.65	Reject H_1	2.83	Reject H_1	3.01	Reject H_1
2.15	0.025	2.8412	2.56	Accept	2.65	Accept	2.83	Accept	3.01	Reject H_1

Table 11
Values of the t evaluated for $\alpha = 0.025$.

t table	t Evaluated	X
2.8412	2.56	2.44
2.8412	2.65	2.45
2.8412	2.83	2.47
2.8412	3.01	2.49

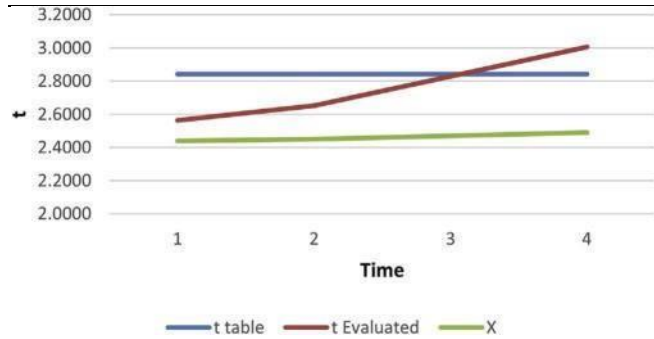


Fig. 3. Evolution of t-student values according to Table 15.

Table 12
Forecasting the next value for X^* of soot.

Time	1	2	3
Sample Average (X)	2.45	2.47	2.49
$S_{t+1} (\beta=0.2)$	2.45	2.45	2.46
Limit	2.50	2.50	2.50

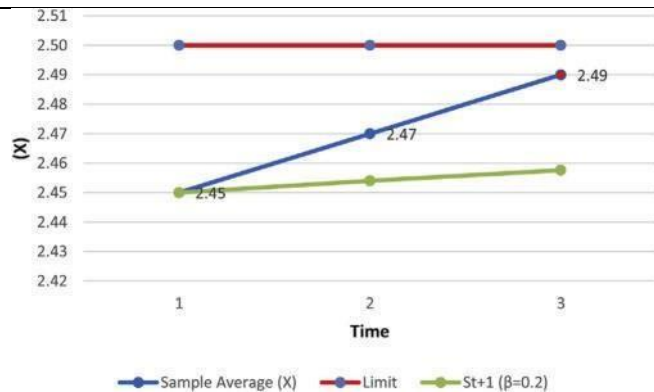


Fig. 4. Graph of the prediction of the soot degradation (mean average).

all components to be lubricated:
- High anti-oxidant point;

- Alkaline reserve of high stability throughout the oil life.

Table 3 shows the intervals for oil replacement in the vehicles studied (see Table 2).

The monitoring involved the periodic collection of oil samples from the vehicles selected. A small number of samples was selected for analysis. For comparative purposes, we also collected data from older samples of buses in the same homogeneous groups. These samples were sent to the laboratory, along with the following description of the characteristics of the vehicle and the type of oil: vehicle number; brand; model; type of vehicle; engine; number of kilometers of equipment; number of kilometers of oil; date of the sample; date of sample submission.

All the variables were studied, even though the project focused only on those considered more important for oil degradation: soot (carbon matter); viscosity; TBN; wear and contamination metals; particles. The study of the variables used the limits suggested by the laboratory (Table 4). One of the variables considered most important was soot or carboniferous matter (%).

4.1. Model applied to one variable

An increase in the concentrations of the metal particles suggests an increasing in the abnormal operating conditions. This type of observation requires fast maintenance attention.

To analyze this, first, we applied the exponential smoothing method to the iron content (Fe) to determine the evolution of the degradation of the engine, as is shown in Table 5 and Fig. 1 - the table and graph show a clear degradation due the iron content in the analyzed oils. Obviously, the prediction of the next values imply increased degradation. When this variable has values like those shown in the table, the oil must be replaced, because the equipment is at a high risk level.

Next, we followed up on the evolution of the variable Fe using the tstudent distribution. The objective was to estimate the average value of iron (Fe). As Table 6 shows, the average Fe content was 51 (ppm). This is above the upper normal limits (> 90 ppm), suggesting a high level of

degradation. Note that with the t-student test, it is possible to calculate other important data, such as the sample mean, sample standard deviation, and upper parameter limit for several confidence intervals.

Finally, we estimated the population average of the iron for the following significance levels: 0.001; 0.01; 0.05; 0.1; 0.2. As Table 7 shows, with a value of 80 (ppm) and a confidence interval of 99%, the hypothesis H_0 is not rejected. But with a 90% confidence interval, H_0 will be rejected because the value of t (1.59) is higher than the value of the confidence interval (1.41). Furthermore, with a confidence interval of 80% (0.90) and a sample average of 51.00, the average value is 37.59.

Several variables can be evaluated using this monitoring model to show the evolution of the oil degradation. In this study, we applied the model three ways:

1) To all vehicles individually (all parameters); 2) To homogeneous groups of vehicles (all parameters); 3) To the group of vehicles using biodiesel (all parameters).

We applied exponential smoothing model to the iron content (Fe) variable for bus number XX₃. When this variable has high values, the equipment is at a high risk level, and the oil must be changed. The second model, the t-student test, was used to monitor the degradation of the iron content. It is also possible to calculate more information such as the sample mean, the sample standard deviation and the upper limit of the parameter to determine the confidence intervals. If the value of

Table 13

Oil change intervals according to manufacturer/unavailability of bus.

Vehicle Type	Intervals [km]	Km annual	Oil Type	Lubrication quantity p/year [un]	Unavailability [h]	Unavailability [days]
Mercedes Benz O-530	50 000	60 000	Lubricant I	1	8	1
Mercedes Benz O-405	25 000	65 000	Lubricant III	3	18	3
Volvo B7RLE	24 000	55 000	Lubricant I	2	16	2
Volvo B7L	20 000	50 000	Lubricant I	3	18	3
MAN 12.240 HCL	20 000	70 000	Lubricant II	4	25	4
Volvo B10B/B10L	15 000	60 000	Lubricant III	4	28	4
Total					113	16

Table 14

Oil change intervals according to manufacturer/cost of changing oil.

Vehicle Type	Intervals [km]	Km annual	Oil Type	Oil price [€]	Material [€]	Labour cost [€]	Total cost/year [€]
Mercedes Benz O-530	50 000	60 000	Lubricant I	101,40 €	7,12 €	70,00 €	214,22 €
Mercedes Benz O-405	25 000	65 000	Lubricant III	50,00 €	5,30 €	70,00 €	325,78 €
Volvo B7RLE	24 000	55 000	Lubricant I	109,20 €	10,20 €	70,00 €	434,04 €
Volvo B7L	20 000	50 000	Lubricant I	81,90 €	6,04 €	70,00 €	394,85 €
MAN 12.240 HCL	20 000	70 000	Lubricant II	110,76 €	8,50 €	70,00 €	662,41 €
Volvo B10B/B10L	15 000	60 000	Lubricant III	96,00 €	10,40 €	70,00 €	705,60 €
Total					47,56 €	420,00 €	2 736,91 €

Table 15

Decreasing intervals for oil change/unavailability of bus.

Vehicle Type	Intervals [km]	Km annual	Oil Type	Lubrication quantity p/year [un]	Unavailability [h]	Unavailability [days]
Mercedes Benz O-530	30 000	60 000	Lubricant I	2	14	2
Mercedes Benz O-405	20 000	65 000	Lubricant III	3	23	3
Volvo B7RLE	15 000	55 000	Lubricant I	4	26	4
Volvo B7L	20 000	50 000	Lubricant I	3	18	3
MAN 12.240 HCL	15 000	70 000	Lubricant II	5	33	5
Volvo B10B/B10L	10 000	60 000	Lubricant III	6	42	6
Total					155	22

Table 16

Decreasing intervals for oil change/cost of changing oil.

Vehicle Type	Intervals [km]	Km annual	Oil Type	Oil price [€]	Material [€]	Labour cost [€]	Total cost/year [€]
Mercedes Benz O-530	50 000	60 000	Lubricant I	101,40 €	7,12 €	70,00 €	357,04 €
Mercedes Benz O-405	25 000	65 000	Lubricant III	50,00 €	5,30 €	70,00 €	407,23 €
Volvo B7RLE	24 000	55 000	Lubricant I	109,20 €	10,20 €	70,00 €	694,47 €
Volvo B7L	20 000	50 000	Lubricant I	81,90 €	6,04 €	70,00 €	394,85 €
MAN 12.240 HCL	20 000	70 000	Lubricant II	110,76 €	8,50 €	70,00 €	883,21 €
Volvo B10B/B10L	15 000	60 000	Lubricant III	96,00 €	10,40 €	70,00 €	1 058,40 €

Total			47,56 €	420,00 €	3 795,20 €
-------	--	--	---------	----------	------------

Table 17
Increasing intervals for oil change/unavailability of bus.

Vehicle Type	Intervals [km]	Km annual	Oil Type	Lubrication quantity p/year [un]	Unavailability [h]	Unavailability [days]
Mercedes Benz O-530	60 000	60 000	Lubricant I	1	7	1
Mercedes Benz O-405	30 000	65 000	Lubricant III	2	15	2
Volvo B7RLE	30 000	55 000	Lubricant I	2	13	2
Volvo B7L	30 000	50 000	Lubricant I	2	12	2
MAN 12.240 HCL	30 000	70 000	Lubricant II	2	16	2
Volvo B10B/B10L	20 000	60 000	Lubricant III	3	21	3
Total					84	12

150 (ppm) is found for iron content, with a 99% confidence interval, the hypothesis H_0 is not rejected. But if the confidence level is 90%, H_0 is rejected. The value of t (2.35) cannot be greater than the value of the confidence interval (1.53). If the value of t is used from the t-student table (with 80% confidence interval (0.90) and sample mean of 99.80), a mean value for a population of 70.48 is obtained.

From the oil analysis, it is possible to detect serious faults in engines, as, for example, in buses numbers X_1 and XXX_2 , avoiding greater

Table 18
Increasing intervals for oil change/cost of changing oil.

Vehicle Type	Intervals [km]	Km annual	Oil Type	Oil price [€]	Material [€]	Labour cost [€]	Total cost/year [€]
Mercedes Benz O-530	50 000	60 000	Lubricant I	101,40 €	7,12 €	70,00 €	178,52 €
Mercedes Benz O-405	25 000	65 000	Lubricant III	50,00 €	5,30 €	70,00 €	271,48 €
Volvo B7RLE	24 000	55 000	Lubricant I	109,20 €	10,20 €	70,00 €	347,23 €
Volvo B7L	20 000	50 000	Lubricant I	81,90 €	6,04 €	70,00 €	263,23 €
MAN 12.240 HCL	20 000	70 000	Lubricant II	110,76 €	8,50 €	70,00 €	441,61 €
Volvo B10B/B10L	15 000	60 000	Lubricant III	96,00 €	10,40 €	70,00 €	529,20 €
Total					47,56 €	420,00 €	2 031,28 €

Table 19

Months	Bus Fleet	Availability	Need	Maintenance	Reserve Fleet
January	115	97	90	18	7
February	115	94	90	21	4
March	115	96	90	19	6
April	115	97	90	18	7
May	115	97	90	18	7
June	115	96	90	19	6
July	115	93	90	22	3
August	115	93	90	22	3
September	115	96	90	19	6
October	115	97	90	18	7
November	115	99	90	16	9
December	115	97	90	18	7

Table 20

Availability versus need for buses – systematic preventive maintenance.

January 115 107 90 8 17 February 115 104 90 11 14 March 115 105 90 10 15 April 115 106 90 9 16
 May 115 107 90 8 17 June 115 106 90 9 16 July 115 102 90 13 12 August 115 103 90 12 13
 September 115 106 90 9 16 October 115 107 90 8 17
 November

Availability versus need for buses – condition monitoring/condition based maintenance

Months	Bus fleet	Availability	Need	Maintenance	Reserve fleet
115	109	90	6	19	
December	115	106	90	9	16

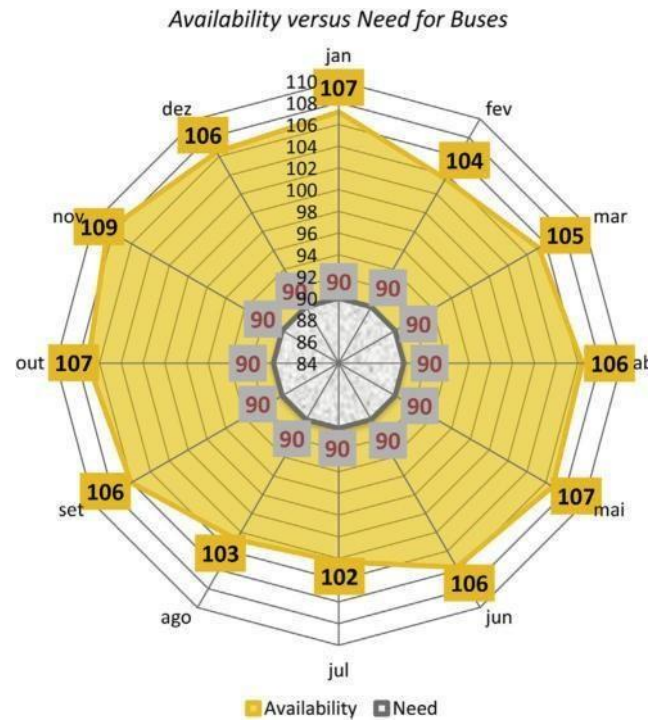
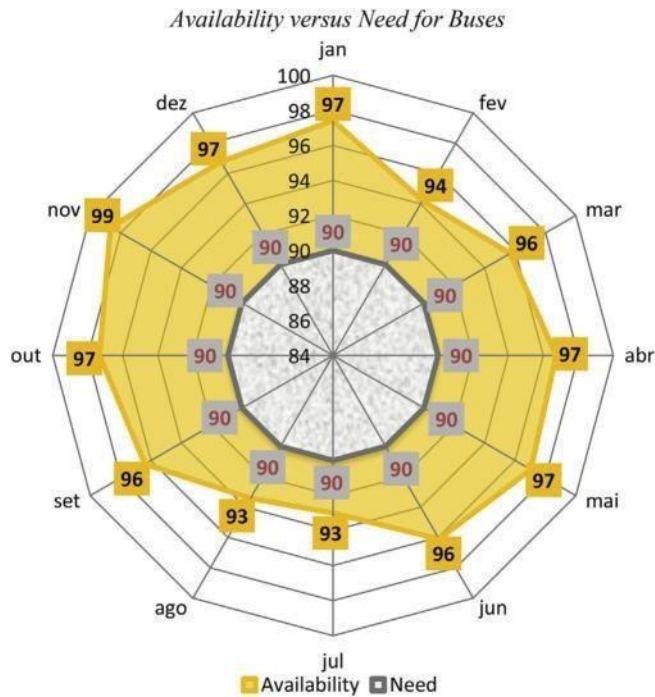


Fig. 5. Availability versus need for buses – systematic preventive maintenance.

financial losses for the company. The diagnosis of the sample for bus number X_1 warns about high iron content (Fe). Possible sources include the skirts, valves, and crankshaft. Another high value in this vehicle's oil is the silicon content (Si), implying the need to control the tightness of the air intake system and filters. Bus number XXX_2 shows signs of high carbonaceous matter (soot). The possible causes include poor combustion, wear, unfiltered air intake, compression levels, and oil filter.

Fig. 6. Availability versus need for buses based on condition monitoring/condition based maintenance.

4.2. Model applied to a vehicle

The case study vehicle was number 287, a bus in the homogeneous group of vehicles. The first variable analyzed was soot (%). We applied the exponential smoothing method to forecast the variable's next value; see Table 8 and Fig. 2. The degradation is quite evident. This parameter is above the normal limit value when their value is $> 2.0\%$ for a diesel engine, and the forecasted value shows an accentuated degradation. When this variable presents this type of variation, the oil should be immediately replaced, because the equipment is at very high risk.

The second model links the exponential smoothing with the t-student distribution, creating a bilateral t-student table. The objective is to estimate when the variable will reach the value limit. Table 9 shows the values for soot based on t-student distribution and exponential smoothing.

Table 10 shows the values of t from the bilateral table and the t evaluated for several values of α . The value of α considered here is 0.025 ($\alpha = 0.025$). The tests for the value of μ is, as noted above, are the following: $H_0: \mu = 2.15$; $H_1: \mu \neq 2.15$.

Table 11 shows the values of t evaluated for $\alpha = 0.025$, and Fig. 3 shows the corresponding graph of the evolution of the values using the t-student distribution.

Table 12 shows the estimated values of soot for the next period, considering the bilateral values determined by the t-student distribution. Fig. 4 shows the corresponding graph of the prediction of the soot degradation using the mean average. As can be seen, the last value is outside the accepted level of risk; therefore, it is accepted the alternative hypothesis ($\mu \neq 2.15$).

This value must be linked with the degradation limit of the condition variable, in this case, soot. Our initial test case used the limit of 2.50, but this was only an example. The objective is to simulate the conjunction between the condition variable degradation and its limit in order to launch a Work Order before the equipment has a fault.

As Fig. 4 shows, the mean of the variable's degradation can be determined for the next period, permitting maintainers to decide if/when the equipment requires a maintenance intervention or can continue normal functioning. The importance of this approach is that it can be extrapolated to other variables, better understanding the limits at which the Work Order should be launched, increasing the availability and reducing the maintenance costs.

4.3. Influence of Oil condition on the availability of the Bus fleet

Because the oil has an enormous influence on the condition of a bus's engine; determining its degradation allows the company to maximize the availability of that particular bus and of the bus fleet more generally.

Table 13 shows the oil change intervals suggested by the oil supplier, as well as the times of unavailability when oil is being changed throughout the year. Table 14 shows the annual costs of lubrication.

Through oil analysis, it is possible to predict the intervals between lubrication. These intervals can be increased or decreased, thereby influencing the cost of maintenance and availability of the bus, as shown in Tables 15–16.

It can be stated that, when the intervals for oil change decrease, the maintenance cost increases (Tables 15–16). By consequence, when the intervals for oil change increase, the cost of maintenance and the vehicle downtime decrease (Tables 17–18).

As the above tables indicate, condition based maintenance permits the maintenance intervals to increase; this increases the bus fleet availability and reduces maintenance costs.

Table 19 shows data for the company under study: the number of buses in the fleet, their availability, the need for buses, the number of buses under maintenance, and the number of buses in the reserve fleet, based on a systematic preventive maintenance policy. Fig. 5 (radar map) shows the availability versus production requirements (number of buses necessary for expected service or need) during a year.

The availability may vary by 10%, depending on the decrease or increase of oil change intervals. More specifically, when oil change intervals are increased, the fleet availability can increase by 10%. Table 20 and Fig. 6 show the results.

5. Conclusions

The implementation of condition based maintenance policies can maximize equipment availability, reduce the costs of maintenance, reduce overhead costs and provide an additional guarantee of reliability.

The paper shows how some variables, such as soot and iron content, indicate the condition of diesel engines. The analysis can be extended to include other variables. The use of time series and statistical inference methodologies allowed us to confirm the evolution of the degradation variables, predict the next values and compare them to the danger limits.

The paper demonstrates that monitoring the condition of oil can increase the availability of equipment and improve fault prevention by allowing early intervention in degradation. It also demonstrates that the implementation of a condition based maintenance policy using oil analysis has huge advantages for public transport companies, including lower downtime, higher availability and, consequently, better service to users. In addition, this policy contributes to the rationalization of the size of a reserve fleet. Finally, the methodology can be used for many other types of physical assets.

References

- [1] Cabral JS. Organização e Gestão da Manutenção. 6ª Edição. Lisboa: Lidel – Edições Técnicas Lda; 2006.
- [2] Assis R. Manutenção centrada na fiabilidade. Lisboa: Lidel – Edições Técnicas Lda; 1997.
- [3] Pinto CV. Organização e Gestão da Manutenção. 2ª Edição. Lisboa: Monitor – Projecto e Edições, Lda.; 2002.
- [4] Wang W. A model to determine the optimal critical level and the monitoring in condition based maintenance. *Int J Prod Res* 2000;38(6):1425–36.
- [5] Ahmad R, Kamaruddin S. An overview of time-based and condition-based maintenance in industrial application. *Comput Ind Eng* 2012;63(1):135–49.
- [6] Seabra J, Graça B. Análise de óleos e massas lubrificantes em Serviço. *Actas do Quinto Congresso Nacional de Manutenção Industrial – APMI. Figueira da Foz*; 1996.
- [7] Gresham RM, Totten GE. Lubrication and maintenance of industrial machinery. Best practices and reliability. Publisher: CRC Press; 2008. 13: 978-1420089356 ISBN-10: 1420089358.
- [8] Makridakis S, Wheelwright S, Hyndman RF. Forecasting -methods and applications. New York: John Wiley & Sons; 1989.
- [9] Farinha JMT. Manutenção – a Terologia e as Novas Ferramentas de Gestão. 1ª Edição. Lisboa: Monitor – Projecto e Edições, Lda; 2011.
- [10] Farinha JT. Asset maintenance engineering methodologies (May 29, 2018). English. Printed in. first ed. USA: CRC Press; 2018. 13: 978-1138035898 ISBN-10: 1138035890.
- [11] Raposo H, Farinha JT, Ferreira L, Galar D. Dimensioning reserve bus fleet using life cycle cost models and condition based/predictive maintenance - a case study. *Public transport* 1 10. Springer Berlin Heidelberg; 2017. p. 1–22. Print ISSN 1866749X. Online ISSN 1613-7159 <https://doi.org/10.1007/s12469-017-0167-x>.
- [12] Raposo H, Farinha JT, Ferreira L, Galar D. An integrated econometric model for bus replacement and spare reserve based on a condition predictive maintenance model. *Maintenance and Reliability. Eksploatacja i Niezawodność-Maintenance and Reliability* 2017;19(3):358–68. ISSN 1507-2711 <https://doi.org/10.17531/ein.2017.3.6>.
- [13] Raposo H, Farinha JT, Ferreira L, Didelet F. Economic life cycle of the bus fleet: a case study. *Int J Heavy Veh Syst* 2019;26(1):31–54 <https://doi.org/10.1504/IJHVS.2019.097109>.
- [14] André JCS. Probabilidades e Estatística para Engenharia. 1ª Edição. Lisboa: Lidel – Edições Técnicas Lda.; 2008.
- [15] NP EN 13306:2007. Terminologia da Manutenção. Instituto Português da Qualidade (IPQ); 2007.
- [16] Mobley RK. An introduction to predictive maintenance. USA: ButterworthHeinemann –Elsevier; 2002. ISBN 0-7506-7531-4.
- [17] Brown M. Applying the predictive approach. New Standard Institute; 2003.
- [18] Lima WC, Sales JAA. Manutenção Preditiva Caminho para a Excelência e Vantagem Competitiva. 2008.
- [19] Otani M, Machado WV. A proposta de desenvolvimento de gestão da manutenção industrial na busca da excelência ou classe mundial. *Rev Gestão Ind* 2008;4(2):01–16. ISSN 1808-0448.
- [20] Raposo H, Farinha JT, Ferreira L. Transporte público de passageiros – a importância da condição dos óleos na qualidade do serviço. *Rev Manutenção/3º trimestre. Grupo Publindústria* 2013;117:4–11.
- [21] Macian Martínez V, Tormos B, Gomez Estrada YA, Bermúdez V. Revisión del proceso de la degradación en los aceites lubricantes en motores de gas natural comprimido y diesel. *Dyna Ingeniería e Industria* 2013;88(1):49–58 <https://doi.org/10.6036/5077>.
- [22] Macian V, Tormos B, Ruiz S, Ramirez R.L. et al In-use comparison test to evaluate the effect of low viscosity oils on fuel consumption of diesel and CNG public buses, *SAE Technical Paper* 2014 - 2014-01-2794. <https://doi.org/10.4271/2014-012794>.
- [23] Macian V, Tormos B, Ruiz S, Ramirez L. Potential of low viscosity oils to reduce CO₂ emissions and fuel consumption of urban buses fleets. *Transport Res Part D* 2015;39:76–88 <https://doi.org/10.1016/j.trd.2015.06.006>.
- [24] Macian V, Tormos B, Miro G, Pérez T. Assessment of low-viscosity oil performance and degradation in a heavy duty engine real-world fleet test. *Proc IMechE Part J: J. Eng. Tribol.* 2015;0(0):1–15 <https://doi.org/10.1177/1350650115619612>.
- [25] Cabrita CP, Cardoso AJM. Concepts and definitions of failure and breakdown in the Portuguese maintenance standards NP EN 13306: 2007 and NP EN 15341: 2009 vol.17. Cascais, Portugal: CISE - Electromechatronic Systems Research Centre, University of Beira Interior; 2013. Ibero-American Congress on Maintenance.
- [26] NP EN 15341:2009. Manutenção – indicadores de desempenho da manutenção (KPI). Instituto Português da Qualidade (IPQ); 2009.
- [27] Ferreira LA. Conferência – gestão de Activos físicos. *Ordem dos Engenheiros*; 2013.
- [28] Ferreira L, Silva A. Importância de Atingir Níveis Elevados de Disponibilidade e Segurança em Sistemas Complexos. Comunicação ao 1º Congresso Mundial de Manutenção. Brasil: Salvador-Bahia; 2002.
- [29] Loureiro H. Excel 2013 Macros e VBA. FCA, Março de 2014; 2014. ISBN: 9789727227778.
- [30] Lapponi JC. Estatística usando Excel. Brasil: Elsevier Editora, Lda.; 2005. ISBN-10: 8535215743. ISBN-13: 978-8535215748.
- [31] Newell GE. (3). Oil analysis cost-effective machine condition monitoring technique. *Industrial Lubrication and Tribology* vol.51. MCB University Press; 1999. p.

- 119–24. ISSN 0036-8792.
- [32] Macián V, Tormos B, Olmeda P, Montoro L. Analytical approach to wear rate determination for internal combustion engine condition monitoring based on oil analysis vol.36. Elsevier Science Ltd. Tribology International; 2003. p. 771–6[https://doi.org/10.1016/S0301-679X\(03\)00060-4](https://doi.org/10.1016/S0301-679X(03)00060-4).
- [33] Vališ D, Žák L, Pokora O. Failure prediction of diesel engine based on occurrence of selected wear particles in oil. *Eng Fail Anal* 2015;56:501–11<https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2014.11.020>.
- [34] Changsong Z, Liu P, Liu Y, Zhang Z. Oil-based maintenance interval optimization for power-shift steering transmission. *Adv Mech Eng* 2018;10(2):1–8<https://doi.org/10.1177/1687814018760921>.
- [35] Macián V, Tormos B, Ruíz S, Miró G. Low viscosity engine oils: study of wear effects and oil key parameters in a heavy duty engine fleet test. *Tribol Int* 2016;94(1):240–8.
- [36] Macián V, Tormos B, Miró G, Pérez T. Assessment of low-viscosity oil performance and degradation in a heavy duty engine real-world fleet test. *Proc IMechE Part J: J Eng. Tribol.* 2016;230(6):729–74<https://doi.org/10.1177/1350650115619612>.
- [37] Macián V, Tormos B, Ruíz S, Ramírez L. Potential of low viscosity oils to reduce CO2 emissions and fuel consumption of urban buses fleets vol.39. *Transportation Research Part D - Transport and Environment*, Elsevier Ltd; 2015. p. 76–88<https://doi.org/10.1016/j.trd.2015.06.006>.
- [38] Tormos B, Martín J, Carreño R, Ramírez L. A general model to evaluate mechanical losses and auxiliary energy consumption in reciprocating internal combustion engines. *Tribology International* vol.123. Elsevier Ltd; 2018. p. 161–79<https://doi.org/10.1016/j.triboint.2018.03.007>.
- [39] Valis D, Zak L, Pokora O. Engine residual technical life estimation based on tribo data. *Eksploatacja i Niezawodnosc-Maint. Reliab.* 2014;16(2):203–10. ISSN 15072711.
- [40] Valis D, Zak L, Pokora O. Contribution to system failure occurrence prediction and to system remaining useful life estimation based on oil field data Sage Publications Ltd Proceedings of the institution of mechanical engineers, Part O: journal of risk and reliability 2015;229(1):36–45. ISSN 1748-006X <https://doi.org/10.1177/1748006X14547789>.
- [41] Valis D, Žák L, Pokora O, Lansky P. Perspective analysis outcomes of selected tribodiagnostic data used as input for condition based maintenance. *Reliab Eng Syst Saf* 2016;145(1):231–42. ISSN 0951-8320.
- [42] Zhu X, Zhong C, Zhe J. Lubricating oil conditioning sensors for online machine health monitoring—a review. *Tribol Int* 2017;109:473–84<https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.01.015>.
- [43] Motamen SF, Morina A, Neville A. The effect of soot and diesel contamination on wear and friction of engine oil pump. *Tribol Int* 2017;115:285–96. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.05.041>. ISSN 0301-679X.
- [44] Sen PK. Review: contemporary textbooks on multivariate statistical analysis: a panoramic appraisal and critique. *J Am Stat Assoc* 1986;81(394):560–4<https://doi.org/10.2307/2289251>.
- [45] Schervish MJ. A review of multivariate analysis. *Stat Sci* 1987;2(4):396–413<https://doi.org/10.1214/ss/1177013111><https://projecteuclid.org/euclid.ss/1177013111>.
- [46] Jun HB, Kiritsis D, Gambera M, Xrouchakis P. Predictive algorithm to determine the suitable time to change automotive engine oil. *Comput Ind Eng* 2006;51(4):671–83<https://doi.org/10.1016/j.cie.2006.06.017>.