

Universidad Internacional del Ecuador



Escuela de Ingeniería Automotriz

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

**Análisis de la tendencia de desgaste de un motor de encendido
provocado de un vehículo M1 de uso público utilizado el análisis de
aceite usado**

Narciso Segundo Cabascango Collahuazo

Director: Ing. Santiago Orozco MS.c

Quito, marzo 2021

CERTIFICACIÓN

Por medio del presente certificado doy a conocer que el artículo presentado es la autoría de Segundo Narciso Cabascango Collaguazo, 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.



Segundo Narciso Cabascango Collaguazo

Yo, Ing. Santiago Orozco Alarcón, 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. Santiago Orozco MS.c

DIRECTOR

DEDICATORIA

El presente trabajo va dedicado a mi familia a mi Padre y Madre son el orgullo de mi vida, los mismos que con cariño, amor y paciencia han inculcado, el espíritu de lucha para siempre buscar y asumir los retos que la vida me ponga por adelante.

A mis compañeros de aula por apoyarme en los momentos académicos más difíciles para que pueda aprender y salir adelante con mucho esfuerzo.

A mis queridos profesores por brindarme sus conocimientos y sabiduría para hacer de mí una persona digna y uno de los mejores técnicos en nuestra especialidad.

Narciso Cabascango

AGRADECIMIENTO

El agradecimiento más grande al ser, quien con su infinita bondad ha permitido que llegue al final de esta meta y comienzo de una nueva vida profesional junto a los míos, a mi Dios.

A mi familia, y amigos quienes me han alentado cuando creían estar derrotado.

A la Universidad quienes más allá de un fin de enseñanza, esta su compromiso por hacer de cada estudiante un profesional con los conocimientos necesarios para enfrentar a la sociedad y sus retos diarios.

Narciso Cabascango

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIÓN	II
DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTO	IV
INDICE DE FIGURAS	VI
INDICE DE TABLAS	VI
RESUMEN	VIII
1.INTRODUCCIÓN.	1
2. MARCO TEÓRICO	2
2.1 LUBRICACIÓN Y DESGASTE.....	2
2.2 ÍNDICE DE DENSIDAD FERROSA.....	3
2.3 TRANSPORTE COMERCIAL.....	3
3. MATERIALES Y METODOS	4
3.1 MÉTODO.	4
3.2 MATERIALES	4
3.2.1 VEHÍCULO.	4
3.2.2 PRUEBAS	5
3.2.3 LUBRICANTE DE PRUEBA.....	5
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	5
4.1 VISCOSIDAD	6
4.2 DESGASTE VINCULADO AL AIRE ATMOSFÉRICO.....	6
4.3 PARTÍCULAS DE DESGASTE	6
5. CONCLUSIONES	7
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	8

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Función antioxidante del lubricante.....	2
Figura 2. Influencia del tamaño de partículas en el desgaste del motor	2
Figura 3. Relación entre el índice de densidad ferrosa y las partículas disueltas de hierro.....	3
Figura 4. Vehículo de prueba, tipo taxi.....	4
Figura 5. Variación de viscosidad del aceite SAE 20W-50.....	5
Figura 6. Variación de partículas de Si y Na en el aceite SAE 20W-50.....	5
Figura 7. Relación entre las partículas de Si –Fe para MEP.....	6
Figura 8. Relación entre las partículas de Si –Al para MEP.....	6
Figura 9. Relación de las partículas de Fe y el índice PQ	7

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Elementos y origen de partículas en un MCIA.....	2
Tabla 2. Pruebas de análisis de metales y tribología.....	4
Tabla 3. Propiedades de aceite (muestra virgen)	4

ANÁLISIS DE LA TENDENCIA DE DESGASTE DE UN MOTOR DE ENCENDIDO PROVOCADO(MEP) DE UN VEHICULO M1 DE USO PUBLICO UTILIZADO EL ANALISIS DE ACEITE USADO

Segundo Narciso Cabascango Collaguazo
segu.cabascango@hotmail.com

RESUMEN

La movilidad es una de las prioridades en la gestión de la administración del Distrito Metropolitano de Quito (DMQ), de los medios de transporte masivo, los taxis, constituyen un medio de transporte dentro y fuera de la ciudad, constituyen un universo de 29347 vehículos, para la mejora de los procesos de mantenimiento, el análisis y monitoreo del aceite lubricante brinda mayor confiabilidad acerca del estado real del motor y previene fallas y paradas no planificadas. 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 5000 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, muestra una tendencia constante para el desgaste, los tamaños de las partículas de hierro son pequeñas, el índice PQ combinado con un bajo ppm de hierro indica una tendencia de desgaste normal, también, se descarta la contaminación por el ambiente que rodea el funcionamiento del MEP y la incidencia leve de un desgaste abrasivo para las piezas móviles del motor.

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

ABSTRACT

Mobility is one of the priorities in the management of the administration of the Metropolitan District of Quito (DMQ), of mass transport means, taxis, constitute a means of transport inside and outside the city, constitute a universe of 29347 vehicles. For the improvement of maintenance processes, the analysis and monitoring of the lubricating oil provides greater reliability about the actual state of the engine and prevents unplanned failures and stops. 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 5000 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 MEP. The behavior of the PQ index shows a constant tendency for wear, the sizes of the iron particles are small, the PQ index combined with a low ppm of iron indicates a normal wear trend, also, environmental pollution is ruled out surrounding the operation of the MEP and the low incidence of abrasive wear on the moving parts of the engine.

KEY WORDS: lubricating oils, maintenance engineering, tribology, transportation

1. INTRODUCCIÓN.

El transporte público constituye una alternativa importante al transporte individual, sobretodo en ciudades con alto flujo de vehículos particulares con gran tráfico. Argumentos a favor del uso del transporte público con frecuencia se centran en el costo, la disponibilidad y el impacto ambiental.

Las empresas transportistas de servicio público, tienen un interés evidente en monitorear su desempeño para reducir los costos y aumentar la disponibilidad [1].

El estado general del motor se analiza con base a sus prestaciones de potencia, torque y emisiones de gases. La norma ISO 17359, establece las directrices para los procedimientos generales que se deben considerar al establecer un programa de monitorización de condición de máquinas [2]. Un enfoque de monitoreo de condición con el análisis de lubricante usado, favorece la disponibilidad de los sistemas monitoreados. En el monitoreo de condición, cuando una lectura de un parámetro es más alta que una preestablecida, se considera un nivel crítico, el equipo monitorizado se declara averiado y se activa una intervención de mantenimiento.

El análisis y monitoreo del aceite lubricante brinda mayor confiabilidad acerca del estado real del motor y previene fallas y paradas no planificadas [3]. En los motores de

combustión interna, donde el combustible es quemado, la lubricación se ve en medida afectada 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 [4].

La movilidad es una de las prioridades en la gestión de la administración del Distrito Metropolitano de Quito (DMQ). En el caso del servicio de taxis tiene referencias específicas en el Plan Maestro de Movilidad de Quito 2009-2025, ya que 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 [5]

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, de la marca más representativa del país.

2. MARCO TEORICO

2.1 LUBRICANTES Y DESGASTE

Cualquier procedimiento que reduzca la fricción entre dos superficies móviles es denominado lubricación. Cualquier material utilizado para este propósito es conocido como lubricante. Los lubricantes de uso automotriz son líquidos, diferenciados en tres tipos según origen, siendo estos, minerales, semi-sintéticos y sintéticos.

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 5W-40, es un aceite multigrado, ya que posee una viscosidad a baja temperatura y otra diferente a alta temperatura [6]

Las funciones del lubricante, se mejoran con el paquete de aditivos, que se añade a la base del lubricante. Los tipos de aditivos son antioxidantes (figura 1), antidesgaste, dispersantes, anticorrosivos, anti-espuma, de extrema presión, entre otros.

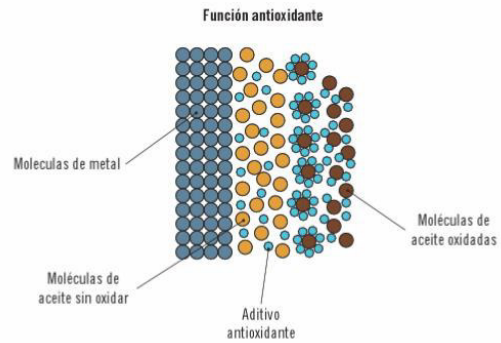


Figura 1. Función antioxidante del lubricante [7]

En los motores, este desgaste se genera en zonas de rozamiento con lubricación defectuosa o la presencia de cargas específicas elevadas (figura 2), tales es el caso del conjunto pistón-segmentos-camisa, en este caso los factores esenciales del desgaste son: las condiciones de operación, combustible, lubricante y la tecnología y metalurgia del elemento [3].



Figura 2. Influencia del tamaño de partículas en el desgaste del motor [3]

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. 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 [8].

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, como se observa en la tabla 1.

Tabla 1. Elementos y origen de partículas en un MCIA [8].

Elementos	Origen
Silicio	Polvo del ambiente/Aditivo antiespumante
Calcio	Aditivos detergente
Zinc, Fósforo	Aditivos anti-desgaste
Hierro	Pistones y camisas
Cromo	Anillos del pistón
Aluminio	Cojinetes principales/Combustible
Estaño, Cobre y Plata	Cojinetes de biela y cojinetes principales
Plomo	Cojinetes del árbol de levas
Vanadio	Combustible
Sodio	Combustible/Aditivo agua de enfriamiento
Boro	Aditivo agua de enfriamiento
Magnesio	Contaminación agua
Níquel	Vástago de válvulas y cigüeñal/Combustible

2.2 ÍNDICE DE DENSIDAD FERROSA (ÍNDICE PQ)

Este ensayo indica la concentración de partículas magnéticas en una muestra. Esta prueba funciona con índices, no tiene unidades. “Este índice nos proporciona información en cuanto a la distribución de partículas por tamaño, pero en la práctica nos permite hacerse una idea de las partículas grandes” [9]. En la figura 3, se muestra la

relación entre las partículas disueltas de hierro y su densidad ferrosa.



Figura 3. Relación entre el índice de densidad ferrosa y las partículas disueltas de hierro.

2.3 TRANSPORTE COMERCIAL

Se denomina servicio de transporte comercial el que se presta a terceras personas a cambio de una contraprestación económica, siempre que no sea servicio de transporte colectivo o masivo. Para operar un servicio comercial de transporte se requerirá de un permiso de operación, Dentro de esta clasificación, entre otros, se encuentran el servicio de transporte escolar e institucional, taxis, tricimotos, carga pesada, carga liviana, mixto, turístico, los serán prestados únicamente por operadoras de transporte terrestre autorizadas para tal objeto [10].

El servicio de taxis se prestará exclusivamente en el área del territorio ecuatoriano, establecido en el permiso de operación respectivo; y, fletado ocasionalmente a cualquier parte del país, estando prohibido establecer rutas y frecuencias.

El servicio de taxi, consiste en el traslado de terceras personas a cambio de una contraprestación económica desde un lugar a otro dentro del ámbito intracantonal autorizado para su operación,

excepcionalmente fuera de ese ámbito cuando sea requerido por el pasajero. Se realizará en vehículos automotores autorizados para ese efecto con capacidad de hasta cinco pasajeros incluido el conductor. Deberán cumplir las exigencias definidas en el reglamento específico emitido para el efecto y las ordenanzas que emitan los GADS, existen dos tipos de servicio: convencionales y ejecutivos. Según el reporte de la Agencia Metropolitana de Tránsito en el último trimestre de 2019, se presentaron a la revisión técnica vehicular 3773 taxis registrados en el Distrito Metropolitano de Quito [5].

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. MÉTODO

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

El proceso de pruebas 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.

3.2. MATERIALES

3.2.1. 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 [11]. 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, con un kilometraje aproximado de 200000 km, se observa en la figura 4.



Figura 4. Vehículo de prueba, tipo taxi.

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 2, se describe las características del vehículo de prueba.

Tabla 2. Vehículo de prueba

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

3.2.2. 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 3.

Tabla 3. 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 Ficher	Ppm	ASTM D-4928
Propiedad química	TBN	mg KOH/g	ASTM D-2896
Conteo de partículas	Partículas > 1µm	Índice de limpieza	ISO 4406

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.

3.2.3. 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 4.

Tabla 4. 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

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 VISCOSIDAD

La viscosidad relativa, definida por la ecuación 1 [12], tomando 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, se calcula el valor para cada medición.

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

En la figura 5, se muestra la variación de la viscosidad medida y la viscosidad relativa(z).

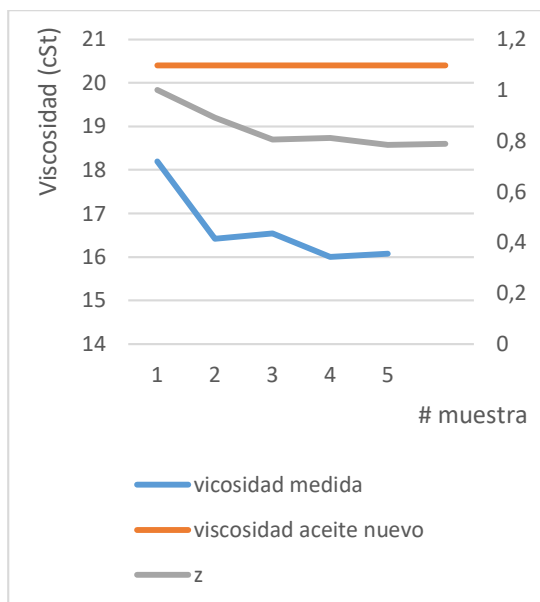


Figura 5. Variación de viscosidad del aceite SAE 20W-50.

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.

4.2. DESGASTE VINCULADO AL AIRE ATMOSFÉRICO.

La evolución de las concentraciones por partículas contaminantes, se muestra en la figura 5., 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.

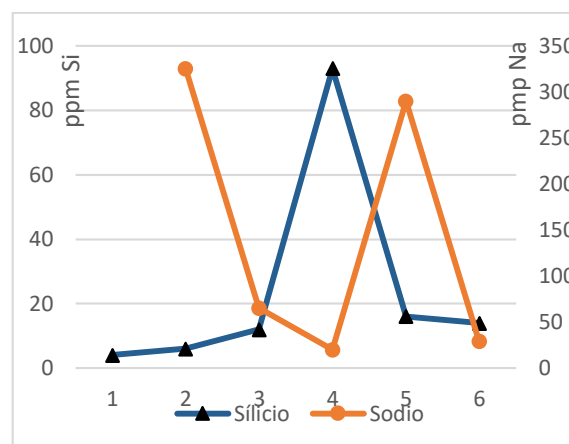


Figura 6. Variación de partículas de Si y Na en el aceite SAE 20W-50.

En el caso del silicio se observa una medición seis veces superior al valor límite en la tercera medición, el resto de 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.

4.3. 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 7, para el vehículo de prueba.

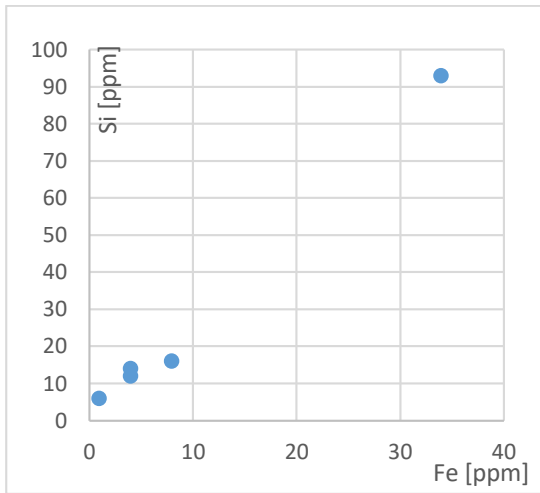


Figura 7. Relación entre las partículas de Si –Fe para MEP.

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

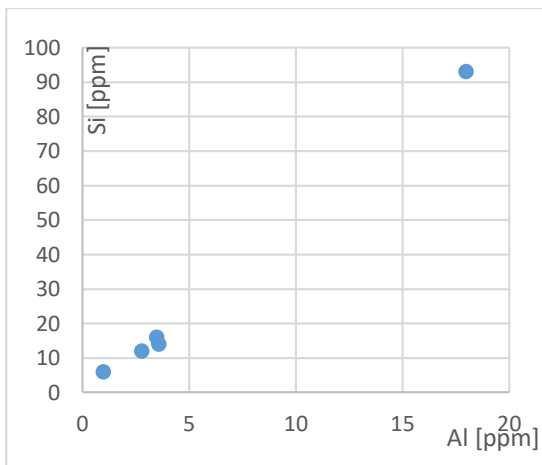


Figura 8. Relación de las partículas de Si y Al

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 9 se muestra el comportamiento del indicador PQ con respecto a las partículas del hierro.

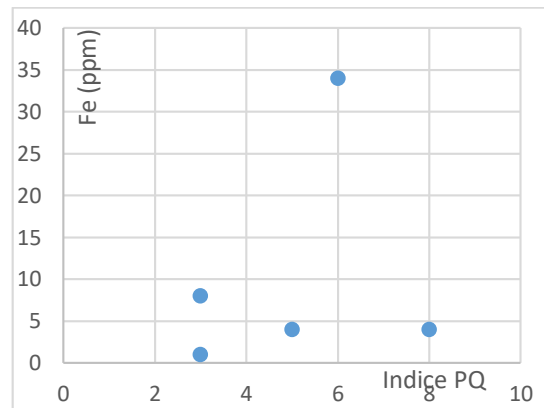


Figura 9. Relación de las partículas de Fe y el índice PQ.

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

5 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

1. Fernández-Feal, M. C., Fernández-Feal, M. L., Sánchez-Fernández, L. R., & Pérez-Prado, J. R. Study of Metal Concentration in Lubricating Oil with Predictive Purposes. *Current Journal of Applied Science and Technology*, 27(6), 1-12. <https://doi.org/10.9734/CJAST/2018/41472>. 2018
2. Antamba Guasgua, J. F. Diagnóstico de la condición operativa del motor por encendido provocado (MEP), según el tipo de gasolina empleado en las ciudades de Quito y Esmeraldas Tesis posgrado, Quito, 2018.
3. 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.
4. Saldivia, F. Aplicación de mantenimiento predictivo. Caso Estudio: análisis de aceite usado en un motor de combustión interna. In XI Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology (LACCEI'2013). México. Documento recuperado de: <http://www.laccei.org/LACCEI2013Cancun/RefereedPapers/RP264.pdf>. 2013
5. Instituto de la Ciudad. EL DMQ Y LA DINÁMICA DE UN SERVICIO DE TAXI QUE EVOLUCIONA. DMQ. 2017
6. Bauset, S., González, P., Martínez, V. M., & Martínez, B. T.. El mantenimiento de las flotas de transporte. *Técnicas Industriales*, 42-47. 2002
7. Arévalo Avalos, D. A. Propuesta de mejora para el mantenimiento del equipo pesado de la constructora COANDES SA basado en un análisis del aceite lubricante usado en los motores de combustión interna diésel (Bachelor's thesis). 2015

8. Tormos, B. Diagnóstico de motores diésel mediante el análisis del aceite usado. Editorial Reverte: España. 2013
9. Bovington, CH. Friction wear and the role of additives. Tercera edición. UK: Springer. 2019
10. Distrito Metropolitano de Quito. Plan Maestro de Movilidad de Quito 2009-2025. 2010
11. AEADE. Anuario 2018. Quito. 2019
12. Sala, J. C. Ramírez, B. Tormos y M. Yago. An Optimization Approach to Fuzzy Diagnosis: Oil Analysis Application. 2007 IEEE International Fuzzy Systems Conference, London. pp. 1-6. doi: 10.1109/FUZZY.2007.4295582. 2007

ANEXOS



Study of Metal Concentration in Lubricating Oil with Predictive Purposes

**M. C. Fernández-Feal^{1*}, M. L. Fernández-Feal¹, L. R. Sánchez-Fernández¹
and J. R. Pérez-Prado¹**

¹*Fuels Laboratory, Centre for Technology Research, University of Coruña,
CIT_Campus de Esteiro, 15403-Ferrol (Coruña), Spain.*

Authors' contributions

This work was carried out in collaboration between all authors. Author MLFF designed the study and wrote the protocol. Author MCFF performed the statistical analysis and wrote the first draft of the manuscript. Authors LRSF and JRPP managed the analyses of the study and the literature searches. All authors read and approved the final manuscript.

Article Information

DOI: 10.9734/CJAST/2018/41472

Editor(s):

(1) Nan Wu, Professor, Department of Mechanical and Manufacturing Engineering, University of Manitoba, Winnipeg, Canada.

Reviewers:

(1) Gergely András, Hungary.

(2) Sandeep Singh, Punjabi University Patiala, India.

(3) Meshack Hawi, Jomo Kenyatta University of Agriculture and Technology, Kenya.
Complete Peer review History: <http://www.sciencedomain.org/review-history/25153>

Original Research Article

Received 20th March 2018
Accepted 1st June 2018
Published 15th June 2018

ABSTRACT

Aims: To determine the concentration of the metals present in a lubricating oil of mineral base, before, during and after its use in the engine of a truck, to know its variation for predictive purposes.

Study Design: In the study, a truck was used in which the lubricating oil of mineral base, diesel grade 15W/40 was tested. Periodically, a sample of the oil contained in the crankcase was taken and the concentration of the metals present in it was determined to know its variation.

Duration of Study: The study was carried out during the period corresponding to 57000 km of operation of the lubricating oil in the engine.

Methodology: The determination of the metals concentration of both new and used lubricating oil samples, extracted from the crankcase after regular periods of its use, was carried out by atomic absorption spectrophotometry.

Results and Conclusion: The analysis of the lubricating oil allowed to know that what was

*Corresponding author: E-mail: coro.fféal@udc.es;

happening inside the engine. It helps to detect wear problems of its components, as well as detecting contamination and degradation suffered by the lubricating oil itself. Thus, it can be considered a valid method in the predictive maintenance of the engine.

Keywords: Lubricating oil; metallic content; atomic absorption spectrophotometry; predictive analysis.

1. INTRODUCTION

During operation, an engine is subject to normal wear and tear of its construction elements due to the continuous friction of its moving parts. Any mechanical system has mobile components which when coming into contact with each other produce frictions. As a result, the fundamental consequences are the resistance to movement, the increase in temperature and the wear of them. Lubricating oils are used to reduce these problems [1,2].

Motor oils are, mostly, liquid products derived from petroleum, complex mixtures of various types of hydrocarbons, with additives to improve their performance. The so-called multigrade oils which are used at present, which came into use for engines in the 1950's, are designed to work in applications where the temperature changes are considerable. Current lubricants are a combination of base oils of mineral or synthetic origin and additives, chemicals of complex formulation whose mission is to improve the performance of oils.

The additives for lubricating oils were used for the first time in 1922 and since then their use have been increasing to the point that nowadays all types of oils has additive. The additives are added in order to:

- Decrease the speed at which certain reactions that are undesirable in the oil occur during your period of service.
- Improve the stability of the lubricating film with respect to variations in operating temperature.
- Protect lubricated surfaces from the aggression of certain contaminants such as water, acids, etc.
- Improve the physical-chemical properties of the oil or provide new ones.

The main types of additives used are viscosity index improvers, pour point depressants, corrosion inhibitors, anti-emulsifiers, defoamers, anti-wear and extreme pressure. The percentage by volume of additives in a lubricating oil is variable, and the additives used in its formulation

can have harmful side effects, especially if the dose is excessive or if reactions occur between them [3,4].

In internal combustion engines, the lubrication system is responsible for lubricating the parts in relative movement. When internal wear occurs, due to the friction between them, the small particles of detached material pass to the oil; the larger ones are deposited in the bottom of the crankcase or are trapped in the filter, the rest will remain in suspension in the oil. The concentration and type of metal particles in suspension in the lubricating oil will determine the origin of the wear and if this can be considered normal or accelerated, Table 1.

In Table 2, we can see the limits for the metallic content normally accepted in the industry for diesel engines, independent of the brand and without considering kilometres or hours of operation [5].

These limits can be considered high within a proactive maintenance plan, in which we must also define the kilometres or hours of use, for which they are established.

The analysis of lubricating oil is considered as a method of predictive maintenance in internal combustion engines. It is a technique that let us know what is happening inside the engine, helping in quick detection of wear problems of the engine components, as well as contamination and degradation of the lubricating oil, problems that can even have environmental consequences [6, 7]. The control of the oil must be supported by a series of periodic and continuous analyses, which can establish the tendency of wear and the need for its replacement.

The lubricating oil analysis [8] is carried out with two different objectives:

1. Check formulations.
2. Evaluate, the concentration of metals after use:
 - Coming from additives, such as barium, zinc, calcium and magnesium, to check their stability and correct functioning.

Table 1. Possible origin of metals in lubricating oil

Element	Symbol	Origin	Most common source
Aluminium	Al	Wear metal, Contaminant	Plungers, Bearings, Contaminants, Lubricating grease.
Barium	Ba	Additive	Detergent additive
Calcium	Ca	Additive, Contaminant	Detergent additive, Lubricating grease, Water.
Copper	Cu	Metal wear, Additive	Bearings, Radiators, Bronze.
Chrome	Cr	Wear metal	Cylinders, Rings, Crankshafts, Gears.
Tin	Sn	Wear metal	Bearings, Bushings, Push systems, Welding material
Iron	Fe	Wear metal	Cylinders, Crankshafts, Gear, Rust, Water.
Magnesium	Mg	Additive, Contaminant	Bearing, additives, seawater.
Nickel	Ni	Wear metal	Camshafts, Gears, Rings, Turbine alloys.
Lead	Pb	Wear metal	Bearings, Babbitt
Sodium	Na	Additive, Contaminant,	Additives, Coolants, Seawater, Lubricating grease.
Zinc	Zn	Metal wear, Additive	EP Additive, Bearings, Coatings

<http://noria.mx/lublearn/analisis-de-elementos/>

- That allows establishing the degree of engine wear such as iron, aluminium, chromium, copper, lead or tin.
- That may appear as a consequence of some kind of external contamination such as sodium.

The analysis of lubricating oil as a tool for the predictive maintenance of diesel engines is still important for the researchers [9]. The evaluation of measurement methods for the different parameters of the lubricating oil is interesting from the point of view of diagnosis, with widely accepted techniques or with techniques still in development [10].

Table 2. Limits normally accepted in industry for diesel engines

M = Element		Normal	Abnormal	Critical
		ppm		
Aluminium	Al	<20	20 - 30	>30
Chrome	Cr	<10	10 - 25	>25
Copper	Cu	<30	30 - 75	>75
Nickel	Ni	<10	10 - 20	>20
Iron	Fe	<100	100 - 200	>200
Sodium	Na	<50	50 - 200	>200
Lead	Pb	<30	30 - 75	>75
Tin	Sn	<20	20 - 30	>30
Silicon	Si	<20	20 - 50	>50

<http://widman.biz/boletines/46.html>

In recent years, it has been noted that the determination of the metallic content of the oil by atomic absorption spectrophotometry [11,12]

continues to be of interest from multiple and varied approaches [13-16].

2. MATERIALS AND METHODS

2.1 Equipment

- Perkin Elmer - Atomic Absorption Spectrophotometer.
Flame Atomic Absorption is a very common technique for detecting metals present in the samples. Atomic flame absorption spectrophotometry (EAAF) allows the detection and determination of metals in any sample as long as it can be solubilised.

The direct determination of metals by AAS is based on the radiation of free atoms with a minimum of interference. The determination is accomplished in the atomised state of the metal after nebulizing liquid samples. The metal is determined at the elected analytical line, using a hollow cathode lamp (HCL) in N₂O / acetylene reducing (rich red) flame.

To calibrate an AAS for metal analysis, standard solutions containing known concentrations of the metal of interest are aspirated into the burner. For each standard, the resulting decrease in intensity of the beam of light given off from the hollow cathode lamp is then set on a



Quantity of material in the cathode	Single-element hollow cathode lamps
less than 5 g	As, Au, B, Ba, Be, Ca, Dy, Er, Eu, Ga, Gd, Ge, Hf, Ho, In, Ir, K, La, Li, Mg, Na, Nd, Pd, Pr, Pt, Re, Rh, Ru, Sc, Se, Sm, Sn, Ta, Tb, Tm, Yb, Y
5 – 10 g	Ag, Al, Bi, Cd, Co, Cr, Mn, Mo, Ni, Sb, Si, Sr, Te, V, W, Zn, Zr
10 – 15 g	Cu, Fe, Hg, Nb, P, Pb, Ti, Tl

Fig. 1. Quantity of material in the cathode, HCL

<https://www.slideshare.net/rosamaria14/espectroscopia-de-absorcion-atomica-parte-1-julio-20-de-2016>

digital readout to reflect the known concentration. Once the instrument has been calibrated, then the unknown fluid is aspirated, and the metal concentration can be obtained from the digital display.

- Monoelement hollow cathode lamps, HCL Perkin Elmer.

The type of tube according to the metal is being analysed.

Hollow-cathode lamps, containing a cathode of the analyte element and an anode, are filled with a noble gas. There is a glow discharge between the cathode and the anode, in which positive gas ions are formed, which sputter element atoms of the cathode at relatively low temperatures.

2.2 Material and reagents

2.2.1 For working standards preparation

- White oil free of metals of adequate viscosity, Conostan. Base oil, metal free, with a viscosity of about 4 cSt at 100°C, which provides good solvency for standards.
- Fat-soluble standards of each of the metals to be determined in the test. Conostan, metallo-organic standards are oil-based metal calibration standards for using in AA, 1000 ppm and 5000 ppm concentration.
- Volumetric flasks, 25 mL and automatic pipette and disposable tips. Material used in the calibrations: preparation of lower concentration standards are used by dilution with white oil of each fat-soluble standard of 1000 ppm.

- Volumetric flasks, 25 mL and automatic pipette and disposable tips.

Material used in the calibrations: preparation of lower concentration standards by dilution with white oil of each fat-soluble standard of 1000 ppm.

2.2.2 Dissolvent

- Methyl isobutyl ketone (MIBK). Methyl isobutyl ketone (MIBK) is used for the dissolution of the samples to obtain a dimmed flame by decreasing the flow of fuel or by supplying an auxiliary oxidant.

2.2.3 Gases for flame production

- Acetylene, fuel.
- Nitrogen oxide, N₂O, oxidant.

2.3 Method

For determination, the atomic absorption spectrophotometry is used [17]; which is an excellent method for the determination of metals at the trace level, comply Beer's Law and based on the absorption of electromagnetic radiation.

The basic instrumentation for the AA is presented in Fig. 2, and is made up of a sources of monochromatic radiation (specific for each element to analyse), an atomiser is used to produce the excited atoms of the substance to analyze; a monochromator to select the wavelength of each element to analyze; a detector that is sensitive to radiation which is emitted and a signal and a reading processor of exit.

The determination of the metal content of the lubricating oil samples, both new and used, was carried out based on the method of the principles of ASTM D4628 [18], through the following steps:

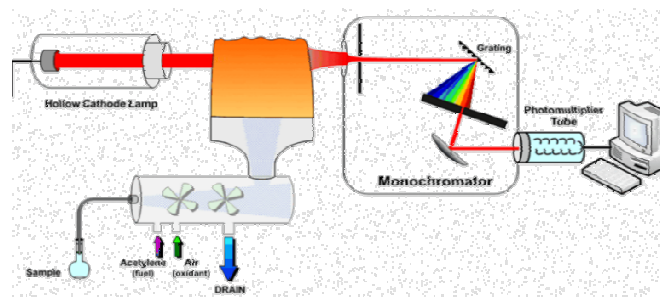


Fig. 2. Atomic Absorption Spectroscopy

<http://testingposts72014.blogspot.com.es/2014/08/atomic-spectroscopy.html>

2.3.1 Preparation and dissolution of the samples

Methyl isobutyl ketone (MIBK) is used for the dissolution of the samples since its viscosity is small and is relatively easy to obtain a dimmed flame by decreasing the flow of fuel or by supplying it as an auxiliary oxidant.

2.3.2 Adjustment of the ratio of fuel and oxidant flows

The flow of oxidant is regulated to achieve optimal fogging, and then the fuel flow is varied until an optimum signal is obtained.

2.3.3 Selection of the appropriate wavelength, analytical line, for each element

Atomic Absorption (AA) occurs when a ground state atom absorbs energy in the form of light of a specific wavelength and is elevated to an excited state.

2.3.4 Calibration

The determination of each element requires its own calibration curve, regression coefficient ≥ 0.99 ; the patterns used for its realization have the same matrix as the sample. The limits of detection of the elements determined in the study are shown in Table 3.

2.3.5 Analysis of the samples

The diesel oil grade 15W/40 used in the study is a multigrade mineral oil, suitable for all types of diesel engines including supercharged. It is also optimal for vehicles working in severe conditions both for the service and environmental. It is formulated to achieve a high detergent-

dispersant level and contains anti-wear additives.

The vehicle used in the study belongs to a fleet of industrial vehicles that at the beginning of the study had been in service for several years complying with the oil changes pre-established for its maintenance program.

Table 3. Detection limits ($\mu\text{g/L}$) EAAF [19]

Element	Detection limits ($\mu\text{g/L}$)
Fe	6
Cu	2
Cr	4
Sn	15
Mn	2
Ni	3
Al	30
Ag	3
Pb	5
Na	0,2
Mg	0,2
Ba	20
Ca	1
Zn	1

Throughout the study, three total oil changes were made, at 0, 17000 and 37000 km of engine operation during the study period, (Table 4). The crankcase had a capacity of 22 L. The control samples were periodically removed from the crankcase and always before proceeding to the scheduled oil change.

3. RESULTS AND DISCUSSION

The metal drum of 208 L containing the new oil, once opened, remains in good condition. Throughout the study, through periodic controls, the oil suffers a level of oxidation that affects its appearance but not its composition.

Table 4. Volume of oil added to the crankcase

Sample	Series 1	Series 2	Series 3	Series 4	Series 5	Series 6	Series 7
km traveled	0	5,000	17,000	27,000	37,000	47,000	57,000
Added oil, L	22	0	22	0	22	0	22

* oil change and filter

Table 5. Metal content of lubricating oil samples

N°	M = Element		0	Period 1			Period 2		Period 3	
			Series 1	Series 2	Series 3	Series 4	Series 5	Series 6	Series 7	
1	Aluminium	[M]	0.0	4.3	4.7	11.0	13.0	25.2	26.6	
2	Chrome	ppm	8.0	7.5	8.0	14.0	15.0	28.0	33.0	
3	Copper		6.0	1.3	2.1	18.0	20.0	11.0	12.0	
4	Nickel		4.6	3.0	4.0	4.6	4.7	4.4	4.8	
5	Iron		11.0	24.0	47.0	59.0	69.0	192.0	207.6	
6	Sodium		5.6	22.0	22.0	28.0	28.6	72.0	104.0	
7	Manganese		1.5	1.3	1.8	2.6	2.6	28.4	28.8	
8	Lead		25.0	19.8	23.6	29.8	33.0	74.0	84.0	
9	Magnesium		47.5	24.4	27.8	42.5	42,5	40.0	4.0	
10	Tin		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
11	Barium		0,0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
12	Calcium		1,500.0	1,040.0	1,010.0	1,340.0	1,310.0	1,300.0	1,280.0	
13	Zinc		2,400.0	1,559.0	1,559.0	2,380.0	2,370.0	2,340.0	2,340.0	

The concentrations of the metals determined in the new lubricating oil extracted from the drum (series 1), (Table 5) act as the reference level in this particular study. Among the checked metals (second column of Table 5), barium, aluminium or tin was not found in the new oil.

In the analysis of the data related to the metals concentration in the samples tested, it was taken into account that the study begins with the substitution of a mineral lubricating oil of inferior quality that was used in the engine as grade diesel oil 15W/40. In the lubrication circuit the new oil was mixed with traces of the old oil and the analysis of the results was affected by this problem.

The chosen method for the determination is an analytical technique exhaustively studied and used successfully, on varied matrices, for the determination of elements at trace level. Especially in the case of the determination of metals in lubricating oil, several studies have endorsed their effectiveness [20,21] even in comparison with other techniques [22,23].

The metallic content in the samples oil is shown in Table 5 and Figs. 3, 4, 5, 6: The new oil (series 1) and the used lubricating oil (series 2 to series 7) are extracted from the crankcase respectively to the 5000, 17000, 27000, 37000, 47000 and 57000 km of operation of the engine.

The study of the variation in metal content was carried out for predictive purposes, based on the metal content of the new oil, series 1.

The determination of the metallic content of the oil samples taken periodically from the crankcase during the period of duration of the test, allowed the comparative study in three periods. This was limited by the successive and programmed oil changes at 0, 17000 and 37000 km.

Between the first two oil changes, lubricating oil consumption was found, not very high for the type of oil and condition of the vehicle. The data are consistent with the fact that in modern diesel engines the operating conditions of the piston are harder than of the past, increasing the average temperatures of the piston, which is cooled by the crankcase oil, that leads to an increase in its consumption.

- The **calcium and zinc** content (tables 5, 6 and Fig. 6), metals from the additives that are part of the oil formulation, decreases substantially in period 1, series 2 and 3, calcium decreases by 30% and zinc by 35%. This decrease is related to the fact that it is the first time that the oil is used in the vehicle that previously used oil of different characteristics and lower quality.

At the beginning of the study there are still portions of the old oil in the lubrication

circuit as it is shown by the differences observed when comparing the results obtained for the series 1-2-3 with respect to the series 1-4-5 and 1-6-7. It is observed that the variation in concentration of calcium and zinc follows the same pattern in relation to the [M]/ service time.

Calcium and magnesium originate from the detergent/dispersant additives used to combat the soot, which neutralize the acids formed during combustion and keep pollutants and sludge in suspension until they reach the filter, preventing them from adhering to metal surfaces. Detergent/dispersant additives are consumed when performing the functions for which they were designed.

The speed with which the degradation occurs depends on the quality of the fuel used, the way in which the combustion process takes place and the temperature reached in the engine. The formation of acid compounds as a result of poor combustion and low temperature implies a rapid degradation of this type of additives. So it is essential to know the initial concentration of each additive to determine its degradation.

At 17000 km, before the planned change to 20000 km, the oil, the oil and -air filters were changed to correct the combustion problems that were detected. In periods 2 and 3 of the study, calcium and magnesium maintain the concentration within adequate levels.

Zinc comes from ZDDP (zinc dialkyl dithiophosphate) used in the formulation of extreme pressure additives. ZDDP is an organometallic salt [24], composed of zinc, sulfur and phosphorus that forms a sulphate layer iron on the surface of the pieces, where the sulphur can act to attract zinc, leaving three soft layers to avoid steel-steel contact [25, 26]. During the lifetime of the oil, the concentration limit of ZDDP is the one which is insufficient to achieve its adhesion to the surfaces it must protect. Good oil for a diesel engine (API CI-4) usually has more than 1,550 ppm of zinc, and 1,450 of phosphorus [5].

The variation in Zn concentration observed in the used oil is because of:

- The losses due to the volatility of the additive used, as a result of the absorption by the soot.
- The adhesion to the metal parts.

Zinc works to provide limit lubrication when hydrodynamic lubrication is not enough to tackle the problems caused by pressure and friction.

- The increase in **sodium** indicates the existence of possible contamination, usually by water directly or through humid air entering the engine. The water may have entered due to a mechanical problem or accident.

In the second study period the data revealed a significant increase, although not worrisome, of the concentration of sodium, indicative of contamination by water and attributed to humid air entering the engine. In the third period, the increase is more significant and seems to be related to the accidental entry of water into the engine after high-pressure washing.

Sodium is an element that depends, to a great extent, on the locality where we are working. In a country without sea, a value higher than 10 ppm is an indicator of radiator contamination and more than 15 ppm as a water problem in the engine. A value higher than 40 ppm of sodium may be normal near the sea or in countries where they melt the snow with salt.

- The presence of water causes rust, which agrees with the elevation of the iron content.
- **Iron** is the main wear metal. Some studies postulate that the iron content in the used oil should not be higher than 250 ppm. It is found in used oil as a product of normal wear and tear, as a result of friction between the walls of the cylinders and the rings or by the wear of other metal parts like connecting rods, camshaft, crankshaft, valves, bearings, pump oil, gears, the turbo etc.
- Regarding the other metals determined in the test, increased levels of **lead, aluminium, chromium and copper** are detected as a result of the wear of the metal parts of the engine that have these elements in their composition.

In the case of **aluminium**, although most of it is a consequence of wear, a small part can come from contaminated air that is introduced to the engine.

The concentration of chromium in the used oil is almost exclusively due to the wear of the chromed piston rings. Most heavy-duty diesel engines use chrome rings and the amount found

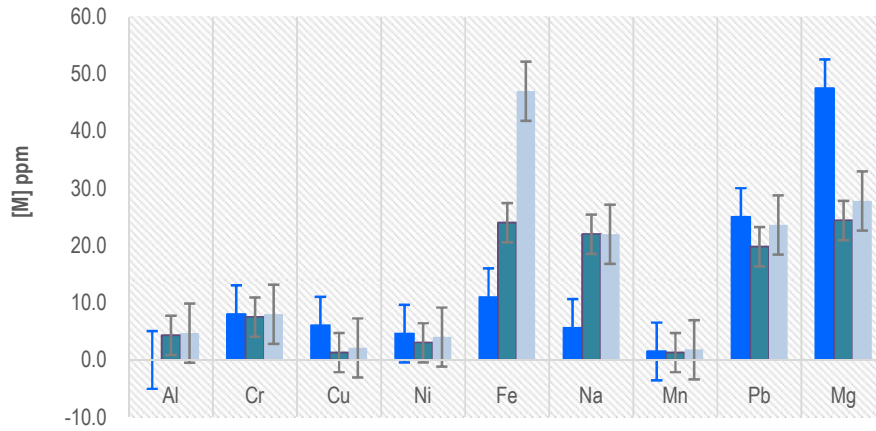


Fig. 3. Variation in metal content, 1 al 11, series 1-2-3.

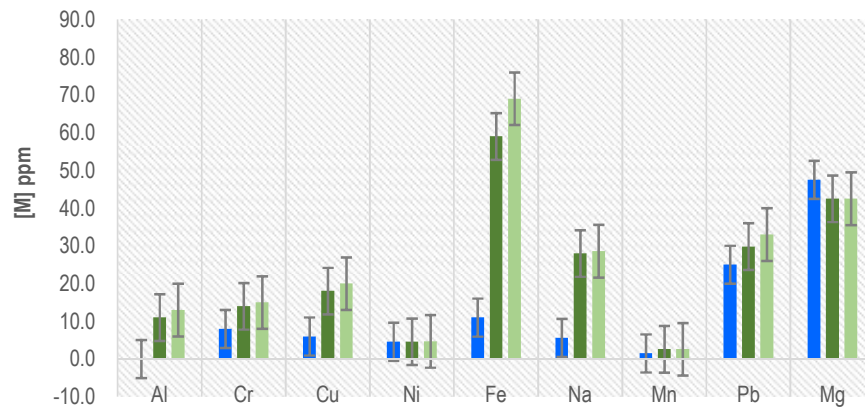


Fig. 4. Variation in metal content, 1 al 11, series 1-4-5

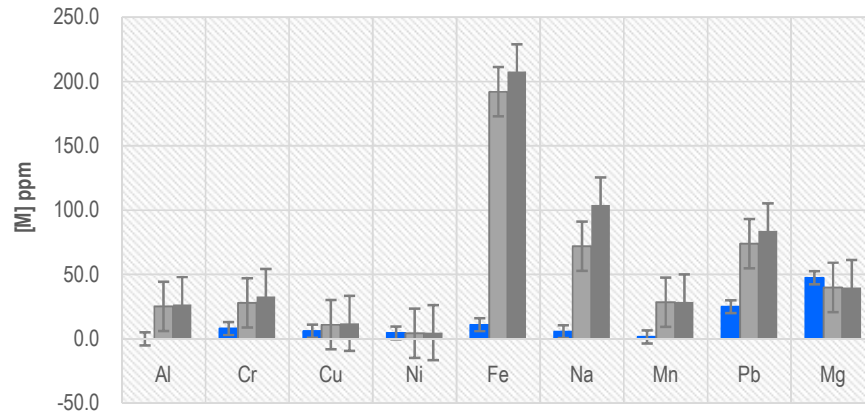


Fig. 5. Variation in metal content, 1 al 11, series 1-6-7

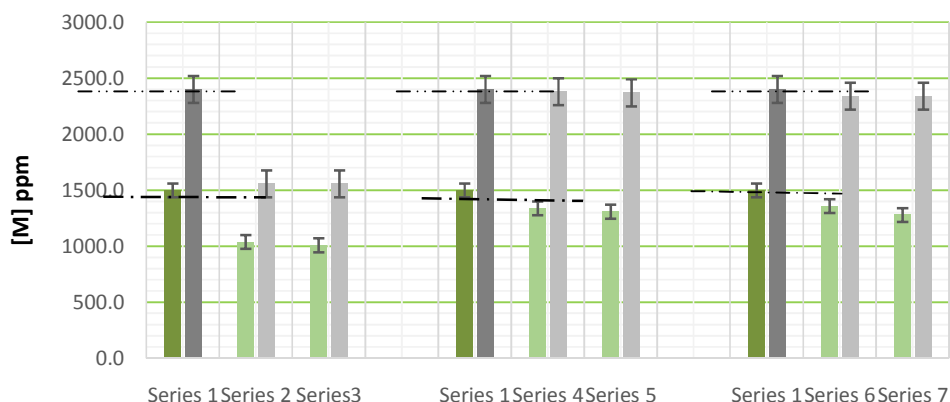


Fig. 6. Variation of the content of Ca y Zn [ppm], periods 1-2-3

Table 6. Content of [Ca] and [Zn] in lubricating oil samples

[M] ppm	Series 1	Series 2	Series 3	Series 4	Series 5	Series 6	Series 7
Ca	1,500.0	1,040.0	1,010.0	1,340.0	1,310.0	1,360.0	1,280.0
Zn	2,400.0	1,559.0	1,559.0	2,380.0	2,370.0	2,340.0	2,340.0

in the oil sample indicates wear on the rings. A chromium concentration of 10 to 25 ppm is already indicative of significant wear.

Copper is a metal commonly used in the engine and normally used in bearings, bushings, oil coolers, thrust washers, valve guides and connecting rod bushings. The wear or corrosion of these elements results in the presence of concentrations higher than 75 ppm in the oil used. The detected levels are not indicative of significant wear.

When analysing the data, (Tables 7, 8, 9) it is important to see not only the absolute value of each element, but also the trend line, the change in the concentrations of elements for consecutive samples. This type of change rate analysis can

be very valuable in locating early signs of wear and pollution.

The analysis helps the vehicle owner with the identification of very serious problems, and indicates where the problem may be located, when the data show values above what is established as "normal".

In a complete analysis of the oil, the determination of the metallic content during its use provides an extremely valuable information of the additives that are part of its formulation, of the wear of the metallic components of the engine and of the possible contaminations, as a consequence of mechanical or accidental problems.

Table 7. Data analysis, period 1

M = Element	0	Period 1		Normal	Abnormal	Critical	Period 1	
	Series 1	Series 2	Series 3				Series 2	Series 3
Aluminium	0.0	4.3	4.7	<20	20 - 30	>30	Normal	Normal
Chrome	8.0	7.5	8.0	<10	10 - 25	>25	Normal	Normal
Copper	6.0	1.3	2.1	<30	30 - 75	>75	Normal	Normal
Nickel	4.6	3.0	4.0	<10	10 - 20	>20	Normal	Normal
Iron	11.0	24.0	47.0	<100	100 - 200	>200	Normal	Normal
Sodium	5.6	22.0	22.0	<50	50 - 200	>200	Normal	Normal
Lead	25.0	19.8	23.6	<30	30 - 75	>75	Normal	Normal

Table 8. Data analysis, period 2

M = Element	0	Period 2			Normal	Abnormal	Critical	Period 2	
	Series 1	Series 4	Series 5	Limit			Series 4	Series 5	
Aluminium	0.0	11.0	13.0	<20	20 - 30	>30	Normal	Normal	
l". Chrome	8.0	14.0	15.0	<10	10 - 25	>25	Abnormal	Abnormal	
Copper	6.0	18.0	20.0	<30	30 - 75	>75	Normal	Normal	
Nickel	[M] 4.6	4.6	4.7	<10	10 - 20	>20	Normal	Normal	
Iron	ppm 11.0	59.0	69.0	<100	100 - 200	>200	Normal	Normal	
Sodium	5.6	28.0	28.6	<50	50 - 200	>200	Normal	Normal	
Lead	25.0	29.8	33.0	<30	30 - 75	>75	Normal	Abnormal	

Table 9. Data analysis, period 3

M = Element	0	Period 3			Normal	Abnormal	Critical	Period 3	
	Series 1	Series 6	Series 7	Limit			Series 6	Series 7	
Aluminium	0.0	25.2	26.6	<20	20 - 30	>30	Abnormal	Abnormal	
Chrome	8.0	28.0	33.0	<10	10 - 25	>25	Critical	Critical	
Copper	6.0	11.0	12.0	<30	30 - 75	>75	Normal	Normal	
Nickel	[M] 5.6	4.4	4.8	<10	10 - 20	>20	Normal	Normal	
Iron	ppm 11.0	192.0	207.6	<100	100 - 200	>200	Abnormal	Critical	
Sodium	5.6	72.0	104.0	<50	50 - 200	>200	Abnormal	Abnormal	
Lead	25.0	74.0	84.0	<30	30 - 75	>75	Critical	Critical	

4. CONCLUSION

Maintenance is a complex and continuous process that involves all the personnel that touch or use a vehicle and includes different actions, among which it is important to maintain the lubrication system in optimum condition.

Checking the condition of the lubricating oil is an important part in maintaining the engine. A detailed analysis of the lubricating oil is fundamental, since it allows knowing thoroughly:

- Its state, for lengthen the periods between oil changes.
- The state of the engine, becoming an important part of its predictive maintenance; thus achieving to extend its lifetime.

It is irresponsible to extend the intervals between oil changes without implementing a proactive procedure that allows establishing the appropriate moment in which to carry it out. Proactive maintenance requires understanding the differences between:

- **Condemnatory limits:** The limits published by manufacturers that indicate a critical situation that requires an oil change with the recommended revisions in their catalogues.

- **Commonly accepted limits:** Limits based on what often seen.
- **Proactive limits:** These are limits set by benchmarking or comparisons with the best results, looking for the best for our company, car, truck, etc.

High temperatures, high shear rates, corrosive environments, external and internal contaminations are the main causes of alterations in the physicochemical properties of the oil, that cause its degradation and consequently the malfunction of the engine.

Determining the metallic content of the lubricating oil is an important step to know its condition. In case of degradation act, it is one of the possible causes before there is a catastrophic failure in the engine.

Although currently there are widely accepted analytical methods for determining the metallic content in oily substances such as plasma spectroscopy (ICP-OES), atomic absorption spectrophotometry can be used for the same purpose with acceptable results.

For proactive purposes, it is convenient to perform an analysis of the oil in which, in addition to the metal content, other characteristics of the oil are determined, such as viscosity, acid number (TAN) or total number of base (TBN) to

obtain a more complete information of what happens in the engine.

COMPETING INTERESTS

Authors have declared that no competing interests exist.

REFERENCES

- Bhushan B. Principles and applications of tribology. USA: Wiley. 1999;1020. ISBN: 0-471-59407-5
- Richard-Booser E. Tribology data handbook, an Excellent Friction, Lubrication and Wear Resource. CRC Press. 1997;1120. ISBN: 978-0-8493-3904-2
- Bovington CH. Friction wear and the role of additives. En: Chemistry and Technology of Lubricatings. 3ªedición. United Kingdom: Springer. 2009;561. ISBN: 978-1-4020-8661-8
- Papay AG. Anti-wear and extreme pressure additives in lubricatings. In Proceedings of 10th International Colloquium. 1996;2:1093–1099.
- Widman Internacional SRL. Available: <http://www.widman.biz> (Acceso: 09 April 2018)
- Betton Cl. Lubricating and their environmental impact. En: Chemistry and Technology of Lubricatings. 3ªedición. United Kingdom: Springer. 2009;561. ISBN: 978-1-4020-8661-8.
- Zięba-Palus J. Examination of used motor oils by flame AAS for criminalistic purposes: A diagnostic study. Forensic Science International. 1998;91: 171-179.
- Burrows JA. Determination of wear metals in used lubricating oils by atomic absorption spectrometry. Analytical Chemistry. 1965;37:579-582.
- Saldivia, F. Aplicación de mantenimiento predictivo. Caso estudio: análisis de aceite usado en un motor de combustion interna. Eleventh LACCEI Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology (LACCEI'2013). "Innovation in Engineering, Technology and Education for Competitiveness and Prosperity" August 14 - 16, 2013 Cancun, Mexico.
- Tormos B. Diagnóstico de motores diesel mediante el análisis del aceite usado. Editorial Reverté; Barcelona. 2013;360. ISBN: 978-84-291-4702-5.
- Jiménez Macías M. Análisis de metales en aceites lubricantes automotrices usados, por espectroscopia de absorción atómica. Instituto Politécnico Nacional-México. Tesis Doctoral; 2011.
- Sanz Segundo, C. Determinación de metales en aceites lubricantes marinos por espectroscopia de absorción atómica y voltametría, utilizando el horno de microondas en el tratamiento de las muestras. Universidad de Cádiz-España, Tesis Doctoral; 1997.
- Hönig V. Determination of oil change interval for diesel engines according to the quantity of non-ferrous metals. Manufacturing Technology. 2017;17(6): 857-863.
- Hönig V, Miholová D, Orsák M. Measurement of wear metals in engine oils by atomic absorption spektrometry method. Manufacturing Technology. 2014; 14(3):317-322.
- Silveira ELC, De Caland LB, De Moura CVB, Moura EM. Determination of contaminants in used lubricating oils and in wastewater contaminated by these lubricatings. Quimica Nova 2006;29(6): 1193-1197.
- Pignalosa G, Knochen M. Determination of wear metals in lubricating oils using flow injection AAS. Atomic Spectroscopy. 2001; 22:250-257.
- Udoh AP. Determination of calcium, magnesium and zinc in unused lubricating oils by atomic absorption spectroscopy". Talanta. 1995;42:1827-1831.
- ASTM D4628-16: Standard Test Method for Analysis of Barium, Calcium, Magnesium and Zinc in unused Lubricating Oils by Atomic Absorption Spectrophotometry. USA.
- Nixon DE, Fassel VA, Kniseley RN. Inductively coupled plasma-optical emission analytical spectroscopy: Tantalum filament vaporization of microliter samples. Analytical Chemistry. 1974; 46:210-213.
- Aucélio RQ, de Souza RM, de Campos RC, et al. The determination of trace metals in lubricating oils by atomic spectrometry. Spectrochimica Acta-Part B Atomic Spectroscopy. 2007;62:952-961.
- De La Guardia M, Salvador A. Flame atomic absorption determination of metals

- in lubricating oils: A critical view. Atomic Spectroscopy. 1984;5:150-155.
22. Vähöja P, Välimäki I, Heino K et al. Determination of wear metals in lubrication oils: A comparison study of ICP-OES and FAAS. Analytical Sciences. 2005;21:1365-1369.
23. Vähöja P, Välimäki I, Roppola K et al. Wear metal analysis of oils. Critical Reviews in Analytical Chemistry. 2008;38: 67-83.
24. Barnes AM, Bartle KD, Thibon VRA. A review of zinc dialkyldithiophosphates (ZDDPS): Characterisation and role in the lubricating oil. Tribology International. 2001;34:389-395.
25. Martin JM. Antiwear mechanisms of zinc dithiophosphate: A chemical hardness approach. Tribology Letters. 1999;6:1-8.
26. Spikes H. The history and mechanisms of ZDDP. Tribology Letters. 2004;17:469-489.

© 2018 Fernández-Feal et al.; This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Peer-review history:
The peer review history for this paper can be accessed here:
<http://www.sciencedomain.org/review-history/25153>

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE
CUENCA**



CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA AUTOMOTRIZ

**TESIS DE GRADO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO AUTOMOTRIZ**

**“PROPUESTA DE MEJORA PARA EL MANTENIMIENTO DEL
EQUIPO PESADO DE LA CONSTRUCTORA COANDES S.A.
BASADO EN UN ANÁLISIS DEL ACEITE USADO EN LOS
MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA DIÉSEL”**

AUTOR

DAVID ALEJANDRO ARÉVALO AVALOS

DIRECTOR

ING. CRISTIAN GARCÍA

CUENCA, 10 DE MARZO DEL 2015

1. Fundamentación teórica del funcionamiento, lubricación y mantenimiento de motores diésel usados en maquinaria pesada.	1
1.1. Generalidades	
1.1.1. Motor Térmico	1
1.1.1.1. Motores de combustión interna alternativos	1
1.1.1.2. Motor Diésel	1
1.1.2. Partes principales del motor diésel	1
1.1.2.1. Bloque Motor	1
1.1.2.2. Culata	1
1.1.2.3. Cigüeñal	2
1.1.2.4. Biela	2
1.1.2.5. Pistón	3
1.1.2.6. Anillos	3
1.1.2.7. Cojinetes	4
1.1.2.8. Válvulas	4
1.1.2.9. Árbol de levas	4
1.1.2.10. Carter	4
1.1.2.11. Turbocargador	5
1.1.2.12. Múltiples de admisión y escape	5
1.2. Funcionamiento del motor diésel	6
1.2.1. Ciclo de Funcionamiento	6
1.2.1.1. Carrera de Admisión	6
1.2.1.2. Carrera de Compresión	7
1.2.1.3. Carrera de expansión	7
1.2.1.4. Carrera de Escape	8
1.3. Sistemas de lubricación en motores diésel	8
1.3.1. Lubricación a Presión	8
1.3.1.1. Componentes	9
1.3.1.2. Funcionamiento	9
1.4. Tribología de motores	10
1.4.1. Regímenes de lubricación	10
1.4.1.1. Lubricación hidrodinámica	11

2.3.1.2.	Frecuencia de fallas.....	32
2.3.1.3.	Matriz de criticidad.....	32
2.3.2.	Criterio de evaluación de parámetros.....	33
2.3.3.	Formatos de evaluación de criticidad.....	33
2.3.4.	Matriz de criticidad de equipos COANDES.....	36
2.3.4.1.	Maquinaria general.....	36
2.3.4.2.	Equipo mayor.....	38
2.3.5.	Resultados del análisis de criticidad.....	39
2.3.5.1.	Cantidad maquinas por nivel de criticidad.....	39
2.3.5.2.	Impacto de la maquinaria de alta criticidad.....	39
2.4.	Equipos críticos.....	43
2.4.1.	Cargadora de túnel Fambition.....	43
2.4.1.1.	Descripción.....	43
2.4.1.2.	Ficha técnica de máquina.....	44
2.4.1.3.	Estado operativo.....	45
2.4.2.	Dumper Terex.....	45
2.4.2.1.	Descripción.....	45
2.4.2.2.	Ficha técnica de máquina.....	46
2.4.2.3.	Estado operativo.....	47
2.4.3.	Compresor Doosan.....	47
2.4.3.1.	Descripción.....	47
2.4.3.2.	Ficha técnica de máquina.....	48
2.4.3.3.	Estado operativo.....	49
2.4.4.	Minicargadora Hyundai.....	49
2.4.4.1.	Descripción.....	49
2.4.4.2.	Ficha técnica de máquina.....	50
2.4.4.3.	Estado operativo.....	51
3.	Análisis del aceite usado en base a la metodología SACODE.....	52
3.1.	Análisis de Aceite.....	52
3.2.	Técnica Sacode.....	52
3.2.1.	Metodología.....	53
3.2.2.	Normalización.....	53
3.2.3.	Identificación de la máquina.....	54
3.2.4.	Definir objetivos y límites condenatorios.....	54

3.2.4.1.	Línea base.....	55
3.2.4.2.	Limite crítico.....	55
3.2.5.	Parámetros de salud (Sa).....	55
3.2.5.1.	Numero básico total.....	55
3.2.5.2.	Viscosidad.....	55
3.2.5.3.	Oxidación y nitración.....	56
3.2.5.4.	Sulfatación.....	57
3.2.6.	Parámetros de contaminación (Co).....	57
3.2.6.1.	Agua.....	57
3.2.6.2.	Silicio (Si).....	58
3.2.7.	Parámetros de desgaste (De).....	59
3.2.7.1.	Metales de desgaste.....	59
3.2.7.2.	Hierro (Fe).....	60
3.2.7.3.	Cromo (Cr) y Níquel (Ni).....	60
3.2.7.4.	Plomo (Pb).....	61
3.2.7.5.	Cobre (Cu).....	61
3.2.7.6.	Estaño (Sn).....	63
3.2.7.7.	Aluminio (Al).....	63
3.2.8.	Diagnostico general de la muestra.....	63
3.3.	Aplicación del análisis de aceite.....	63
3.3.1.	Identificación de la maquinaria.....	64
3.3.2.	Descripción del lubricante utilizado.....	64
3.3.3.	Definición de límites condenatorios críticos a aplicarse en el análisis de aceite.....	65
3.3.3.1.	Viscosidad.....	66
3.3.3.2.	TBN.....	67
3.3.3.3.	Oxidación, nitración y sulfatación.....	68
3.3.3.4.	Silicio.....	68
3.3.3.5.	Agua.....	68
3.3.3.6.	Hierro.....	68
3.3.3.7.	Cobre, Aluminio, Plomo, Estaño, Níquel y Cromo.....	69
3.3.3.8.	Resumen limites críticos.....	69
3.4.	Evaluación de resultados del análisis de aceite.....	70
3.4.1.	Periodo de muestreo y frecuencia de muestreo.....	70

3.4.2. Cargadora de Túnel	70
3.4.2.1. Salud.....	71
3.4.2.2. Contaminación.....	74
3.4.2.3. Parámetros de Desgaste.....	75
3.4.2.4. Análisis de resultados.....	78
3.4.3. Dumper.....	79
3.4.3.1. Salud.....	80
3.4.3.2. Contaminación.....	82
3.4.3.3. Parámetros de Desgaste.....	83
3.4.3.4. Análisis de resultados.....	86
3.4.4. Compresor.....	87
3.4.4.1. Salud.....	88
3.4.4.2. Contaminación.....	89
3.4.4.3. Parámetros de Desgaste.....	91
3.4.4.4. Análisis de resultados.....	94
3.4.5. Minicargadora	95
3.4.5.1. Salud.....	96
3.4.5.2. Contaminación.....	97
3.4.5.3. Parámetros de Desgaste.....	99
3.4.5.4. Análisis de resultados.....	101
4. Propuesta de mejora proactiva del mantenimiento	103
4.1. Análisis del estado actual del mantenimiento	104
4.1.1. Descripción del mantenimiento actual aplicado.....	104
4.1.2. Función administrativa.....	105
4.1.3. Función técnica.....	107
4.2. Procesos puntuales de mejora del mantenimiento	109
4.2.1. Registro y análisis permanente de la criticidad de maquinaria.....	110
4.2.2. Mejora de los sistemas de filtración de aceite y aire.....	111
4.2.2.1. Filtros de Aire.....	111
4.2.2.2. Filtros de Aceite.....	112
4.2.3. Uso de combustible de alta calidad.....	113
4.3. Modelo de diagnóstico de fallas fundamentado en el análisis de aceite	114
4.3.1. Implantación del análisis de aceite.....	116

CI-4	Actual	Servicio severo en motores diésel a partir de 2.002. Para motores de cuatro tiempos con válvula EGR, diseñados para satisfacer las normas de emisiones de escape de 2.004 (de aplicación en octubre de 2.002) y especialmente producidos para utilizar combustibles con menos de 0,5 % de azufre en peso. Estos aceites son superiores a los CH-4 y mejoran la protección contra la oxidación.
------	--------	--

1.5.3 PROPIEDADES PRINCIPALES DE LOS ACEITES LUBRICANTES

Los aceites lubricantes poseen varias propiedades tanto físicas o químicas que describen su comportamiento en el servicio.

1.5.3.1 VISCOSIDAD E ÍNDICE DE VISCOSIDAD

La viscosidad es el frotamiento interno existente entre las moléculas de un fluido al deslizarse entre sí.

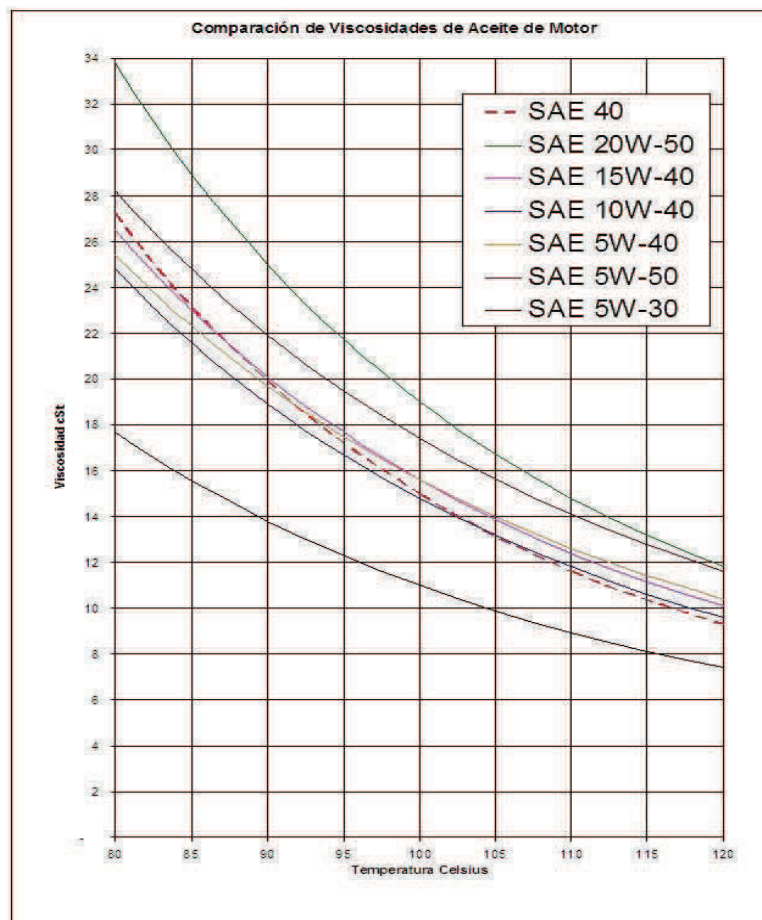


Figura 1. 26 Comportamiento de viscosidad de aceites Diésel a temperatura de régimen. FUENTE: widman.biz

La viscosidad es la característica más importante en la lubricación, esta propiedad permite determinar la capacidad del fluido para mantener la lubricación, esto significa que permite fijar sus pérdidas por la fricción, la capacidad de carga, el rendimiento mecánico y el gasto de fluido para determinadas condiciones de temperatura, velocidad y carga. [1]

1.5.3.2 BASICIDAD Y ACIDEZ

El grado de acidez o basicidad puede expresarse por el número de neutralización respectivo, el cual se define como la cantidad equivalente de miligramos de hidróxido de potasio (KOH) que se requiere para neutralizar el contenido de ácido o base de un gramo (g) de muestra en condiciones normalizadas. [1]

El control de la acidez presente en los aceites permite conocer y evaluar los cambios químicos que presenta el aceite como consecuencia de los ácidos provenientes de los productos de combustión. Para la evaluación de esta propiedad se ha establecido el TAN (Total Acid Number) que es la medida de la acidez total; a su vez la reserva básica del combustible suele expresarse con el TBN (Total Base Number) el cual representa la capacidad para neutralizar los ácidos de la combustión.

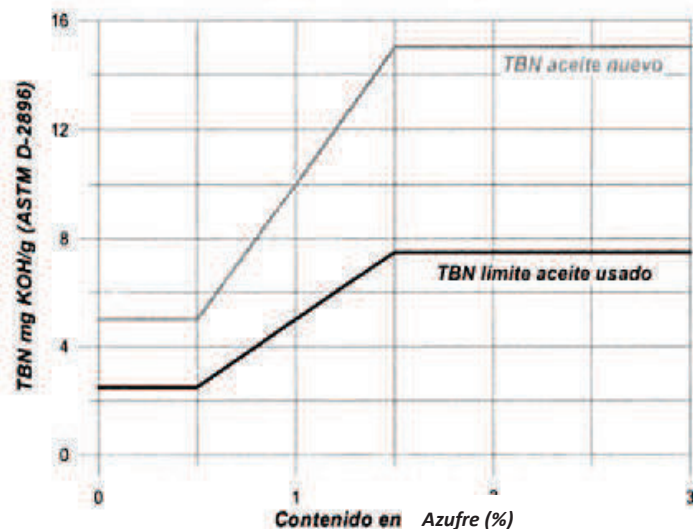


Figura 1. 27 Nivel de TBN necesario según el nivel de azufre en el combustible. FUENTE: Motores de Combustión Interna Alternativos

1.5.3.3 DETERGENCIA Y DISPERSIÓN

Estos aditivos permiten minimizar la formación de depósitos en las partes calientes del motor y lodos en las partes frías de los mismos. Los aditivos dispersantes minimizan los lodos, mientras que los detergentes como los sulfonatos minimizan los depósitos en alojamientos y pistones.

3. ANÁLISIS DEL ACEITE USADO EN BASE A LA METODOLOGÍA SACODE.

3.1 ANÁLISIS DE ACEITE

Al requerir un análisis de aceite del motor de combustión interna, por lo general se recurre al análisis (AA) que viene a ser una excelente herramienta de monitoreo de condición y ayuda a aumentar la confiabilidad de la maquinaria y equipo. El AA radica en realizar una serie de pruebas de laboratorio que se usan para evaluar el estado de los lubricantes usados. Al analizar los resultados del estudio se obtiene la información suficiente que permite tomar medidas en cuanto a la necesidad de cambiar el lubricante o de someterlo a un proceso de filtración o de diálisis. Gracias a este análisis también se pueden diagnosticar las condiciones de desgaste del equipo y de sus respectivos componentes. Es no sólo una tecnología a usarse en el mantenimiento predictivo sino para la búsqueda de causas-raíz de falla y, con ello, una valiosa piedra angular del mantenimiento proactivo.

Aunque en muchos casos, a pesar de que las empresas tienen un programa de análisis de aceite ya establecido, la mayoría de los resultados obtenidos no son precisamente los óptimos posibles; todo esto debido a varias posibles causas:

- Puertos de muestreo incorrectos
- Toma de muestras no-representativas
- Procedimientos de muestreo inadecuados
- Botellas de muestreo no lo suficientemente limpias
- Envío no-inmediato de muestras para su análisis
- Pruebas inadecuadas
- Preparación inadecuada de la muestra en el laboratorio
- Uso de reactivos y solventes contaminados
- Instrumentos no-calibrados
- Personal analista no-calificado
- Errónea interpretación de los resultados de análisis

Todos estos puntos significan una gran pérdida de tiempo, recursos y energía. Especial énfasis tiene el último punto, errónea interpretación de los resultados del análisis, ya que se requiere aportar a todas las personas encargadas del monitoreo de las muestras dentro de la planta, las guías necesarias para la realización de una correcta interpretación, y por ende obtener el máximo beneficio del análisis AA; esto a través del seguimiento sistemático de un método de interpretación llamada la técnica SACODE.

3.2 TÉCNICA SACODE

Es una técnica que se realiza al hacer un seguimiento sistematizado de un método de interpretación, da las bases necesarias para realizar una correcta interpretación de los resultados del Análisis de Aceite.

La sigla SACODE indica el orden con el cual se revisarán las 3 categorías del AA: SA para “salud”, CO para “contaminación” y DE para “desgaste”.

3.2.1 METODOLOGÍA

Dentro de todo análisis lo más importante es considerar mediante la lectura de los datos toda la información referente al equipo que proporcione el reporte de análisis del aceite. También se debe prestar atención y tomar nota de todos los detalles referentes al muestreo, saber por dónde fue tomada la muestra, bajo qué condiciones se lo hizo, conocer si la maquina estaba en operación o no, si la muestra fue tomada después de par el equipo, si la maquina estuvo en desuso durante mucho tiempo, o los detalles de las herramientas con las que se extrajo la muestra y posteriormente donde fueron almacenada. Mucha de esta información no suele estar presente, sin embargo, se deberá tomar en cuenta cada uno de los datos que se tengan disponibles con la finalidad de tomarla en cuenta al momento de obtener las conclusiones finales.

Para un mejor desempeño del análisis utilizando la técnica SACODE se ha implementado un esquema de trabajo:



Figura 3. 1 Esquema de Trabajo. Técnica SACODE
FUENTE: docs.micanaldepanama.com/congreso

3.2.2 NORMALIZACIÓN

Se encuentran dos casos en las que se debe normalizar los datos originales del Análisis de Aceite: cuando las muestras han sido recopiladas en intervalos de tiempo distintos al objetivo y cuando se han hecho compensaciones de aceite en el motor entre muestras. Conviene hacer estos ajustes para evitar llegar a conclusiones erróneas.

3.2.3 IDENTIFICACIÓN DE LA MÁQUINA

Se tomaría como una observación general de las diferentes maquinas en las cuales se está realizando el análisis, tomando en cuenta cada una de las características que nos servirán para el análisis y posteriores conclusiones. En este caso se debe conocer como datos principales, la marca de las maquinas, su modelo, de ser preciso el número de la serie a la que pertenece, el año de fabricación de dicha máquina.

Dentro de cada máquina se debe conocer los datos generales de la misma, que vendrían a ser las características más importantes dentro del trabajo que desempeñan. Ejemplo, en caso de un compresor, donde se debería conocer cuál es la entrega del aire libre, el funcionamiento nominal de presión, el rango de presión. Todos estos datos serán de ayuda al momento de saber en qué condiciones está trabajando cada una de las maquinas, a que cargas están siendo sometidas, y cuáles serían los riesgos de contaminación a los que estarían expuestos por el trabajo que realizan.

El punto más importante de conocimiento de la maquinaria es el motor, en el cual se encuentra el aceite que va a ser objeto del análisis; por lo que los datos y características del motor de cada una de las maquinas son imprescindibles a la hora de realizar la investigación y posterior análisis. Datos como la marca del motor, modelo del mismo, número de cilindros, desplazamiento, velocidad nominal. Son fundamentales a la hora de realizar las conclusiones finales y por lo tanto de las futuras soluciones de los problemas que encontremos.

3.2.4 DEFINIR OBJETIVOS Y LÍMITES CONDENATORIOS.

El análisis del aceite de un motor tiene como objetivo llegar a conocer si en dicho aceite se encuentran partículas de ciertos elementos, los cuales indicaran los posibles daños que pueda tener el motor. Entonces se debe conocer cuáles son los límites permitidos de estas partículas en el aceite para llegar a diagnosticar si verdaderamente existe un daño o no en el motor, o si el aceite todavía se encuentra en óptimas condiciones para el correcto funcionamiento del motor.

- Dato normal: dentro del rango normal, es decir entre los límites críticos.
- Dato anormal: también llamados “pivotes” que se utilizaran como puntos base de referencia para la calificación del reporte. Estos se encuentran fuera del límite crítico.
- Dato de tendencia, se analiza si está dentro de límites normales o críticos. Pero se analiza especialmente al ser un promedio de los muestreos; nos permite una idea global del estado (incremento o de disminución) de el parámetro particular a lo largo del tiempo. A partir de él se puede definir una acción; en caso de existir un dato anormal o pivote que evidencie un problema se compara con el dato de tendencia a fin de decidir si es necesario o no la aplicación de la acción. Pivotes aislados pueden ocasionarse por problemas puntuales de elementos del motor o por condiciones de trabajo de estación. Maquinas con pivotes que además evidencien parámetros de tendencia obligatoriamente evidenciaran problemas más complejos que pueden ser catastróficos.

3.2.4.1 LÍNEA BASE

Son los componentes y características originales del aceite nuevo que se utilizará en la lubricación del equipo como viscosidad, el TBN, algunos metales. Es esencial contar con la suficiente información de la línea base para poder implementar un programa de análisis de aceite efectivo.

3.2.4.2 LIMITE CRÍTICO

Apuntan una condición por sobre la cual se tiene una situación crítica y se requiere realizar una acción inmediata. Además nos permiten identificar para un respectivo parámetro un dato anormal. En el caso de algunos parámetros tales como salud existen límites críticos máximos y mínimos; en caso de desgaste y contaminación generalmente suele existir un único límite máximo.

3.2.5 PARÁMETROS DE SALUD (SA)

Aquí se encuentran presentes aquellos cambios relacionados con el aceite en sí, por ejemplo: viscosidad, contenido de aditivos (P, Zn, Ca, Mg), sulfatación, oxidación, nitración, punto de inflamación, índice de viscosidad, TBN.

3.2.5.1 NUMERO BÁSICO TOTAL

El TBN viene a ser la reserva alcalina o básica de los aceites para neutralizar los ácidos procedentes de la combustión y de la propia oxidación del aceite debido a las elevadas temperaturas. El azufre en el combustible es transformado en productos ácidos, durante su combustión. Resulta lógico pensar que la reserva alcalina del aceite deberá ser mayor cuanto mayor contenido de azufre contenga el combustible, ya que con ello la cantidad de compuestos ácidos formados será mayor. [2]

Bajos niveles de TBN pueden conllevar a una corrosión ácida, esto aumenta la tasa de desgaste del motor y reduce la vida útil de sus componentes. Niveles altos de número base, pueden formar depósitos en el motor. Se recomienda el uso de aceites con TBN entre 50-55 cuando se opera con combustibles pesados con niveles de azufre >2% por peso.

3.2.5.2 VISCOSIDAD

Esta es la característica más importante de un aceite desde el punto de vista de la lubricación y para casi todas las aplicaciones prácticas, ya que de su capacidad física depende la lubricación, esto viene a ser, fijar sus pérdidas por fricción, el rendimiento mecánico, la capacidad de carga, y el gasto del fluido en condiciones determinadas de velocidad, temperatura, cargas, y dimensiones del elemento a calcular.

La viscosidad del aceite de motor se mide a 100°C y debería mantenerse dentro de los rangos establecidos por el API para el grado utilizado. Un SAE 40 o un SAE 15W-40 debería mantenerse entre 12.5 cSt y 16.3 cSt a 100°C.

La pérdida de viscosidad causará mayor desgaste de cojinetes (plomo, estaño, bronce) por falta de lubricación hidrodinámica. El aumento de viscosidad puede causar mayor desgaste de anillos y alta presión de aceite que puede abrir la válvula de alivio de presión del filtro de aceite y pasar aceite sucio al motor. Viscosidad alta causa alto desgaste de cojinetes por lo que demora en llegar en cada arranque.

Si bajó la viscosidad, las causas más probables pueden ser:

- Dilución con aceite más delgado, que puede ser aceite hidráulico, de transmisión, u otro, o por error del operario.
- Contaminación por combustible, problemas de inyectores, falta de termostato, viajes cortos, marcha en vacío, etc.
- Rotura o ruptura de polímeros utilizados para fabricar el aceite multigrado, por cizallamiento, que pueden ser por polímeros baratos, altas temperaturas o presiones o molienda entre los engranajes o anillos.
- Cizallamiento o rotura de aceite base. El aceite básico de baja calidad puede perder su viscosidad.

Si aumentó la viscosidad, las causas más probables pueden ser:

- Oxidación del aceite, a causa de alta temperatura, altas revoluciones o baja calidad de aceite básico.
- Cocción del aceite, por alta temperatura o baja calidad del aceite base.
- Contaminación por agua o glicol, por falla de empaquetadura de culata o perforación de camisas o bloque.
- Contaminación por tierra, que se da por falla del filtro de aire o perforaciones en el sistema de entrada de aire.
- Mezcla con un aceite más viscoso.

3.2.5.3 OXIDACIÓN Y NITRACIÓN

Junto con la viscosidad, la oxidación y nitración del aceite, son los parámetros básicos en el control de estado de los aceites utilizados en el motor, y aunque casi nunca se les asigna límites condenatorios, su evolución puede ser muestra de posibles problemas internos en el motor o sistemas auxiliares.

El aceite con el uso, y más debido a altas temperaturas que debe soportar, va degradándose, produciendo productos que contienen los grupos carbonilo C=O tales como ésteres, cetonas, o ácidos carboxílicos. Estos productos contribuyen a la acidificación del aceite y al consumo de la reserva alcalina del mismo. El efecto de una oxidación prolongada del aceite es un aumento de la viscosidad y su posible acción corrosiva debido a su acidificación. En teoría un proceso de oxidación se debería llevar a cabo de forma lenta y progresiva debido al deterioro normal del lubricante e uso, pero la presencia de metales de desgaste, actuando como



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

DIAGNÓSTICO DE LA CONDICIÓN OPERATIVA DEL MOTOR POR ENCENDIDO PROVOCADO (MEP), SEGÚN EL TIPO DE GASOLINA EMPLEANDO EN LAS CIUDADES DE QUITO Y ESMERALDAS

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL GRADO DE
MAGÍSTER EN SISTEMAS AUTOMOTRICES**

JAIME FERNANDO ANTAMBA GUASGUA

jferantamba@gmail.com

DIRECTOR: ING JORGE MARTÍNEZ CORAL

jmartinezcoral@gmail.com

CODIRECTOR: ING. IVÁN ZAMBRANO OREJUELA

Ivan.zambrano@epn.edu.ec

Quito, marzo, 2018

2.	METODOLOGÍA	22
2.1.	Antecedentes	22
2.2.	Métodos de investigación	22
2.3.	Proceso investigativo	22
2.4.	Fase 1: Estudio de línea base	24
2.4.1.	Pruebas de estado inicial	25
2.5.	Fase 2. Protocolo de pruebas	27
2.5.1.	Plan de monitorización.....	27
2.5.2.	Muestra de aceite, laboratorio y técnicas de análisis del aceite usado....	30
2.5.3.	Escenario de diagnóstico	31
2.6.	Fase 3. Compilación y validación de diagnóstico	32
2.6.1.	Límites permisibles y críticos de mediciones	33
2.6.2.	Validación de la información	34
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	35
3.1.	Estudio de línea base.....	35
3.1.1.	Características de aceite lubricante virgen.....	35
3.1.2.	Curvas de torque y potencia	35
3.1.3.	Inspección de componentes asociados a la operación del motor.....	37
3.2.	Salud del lubricante usado	39
3.3.	Contaminación del lubricante usado.....	43
3.4.	Identificación y cuantificación del desgaste del lubricante usado	44
3.4.1.	Vehículo de pruebas con gasolina Súper.....	44
3.4.2.	Vehículo de pruebas con gasolina Extra	47
3.5.	Relaciones de elementos medidos para los escenarios de diagnóstico	51
3.5.1.	Escenario 1.....	51
3.5.2.	Escenario 2.....	54
3.6.	Tendencia de desgaste del motor de encendido provocado.....	56
3.7.	Discusión	58

1. CONDICIONES OPERATIVAS Y DESGASTE EN LOS MOTORES DE ENCENDIDO PROVOCADO (MEP)

La condición operativa de un vehículo, está dada, por la seguridad, comodidad, calidad y cumplimiento del servicio, según el diseño establecido, para garantizar la disponibilidad, se aplica el plan de mantenimiento dado por los fabricantes, lo que permitiría, la disminución de las averías imprevistas y el aumento de la confiabilidad de los elementos del vehículo, optimizándose recursos, costos y la conservación del medio ambiente.

1.1. Condiciones operativas

Según, Heywood (1998), las condiciones de máxima operación del MEP actual, se obtiene en condiciones de velocidad y tres cuartos de carga. La disminución de la eficiencia bajo estas condiciones, son las siguientes:

- Reducción de velocidad, a menor velocidad existe mayor transferencia de calor en cada ciclo de trabajo
- Incremento de velocidad, a mayor velocidad el desgaste y la fricción son considerables.
- Reducción de torque, provoca un aumento en la limitación del trabajo de bombeo y la importancia relativa de la fricción.
- Incremento de torque, se requiere el retraso del salto de la chispa para evitar la detonación y el enriquecimiento de la mezcla para conservar la operación del catalizador.

Un vehículo con MEP funciona dentro de la condición de la mezcla aire-combustible, provocándose la combustión para la transformación de energía calórica en energía mecánica. La cantidad de mezcla del MEP depende de los siguientes factores:

- Carrera del motor
- Régimen máximo de giro
- Flujo másico de aire
- Rendimiento volumétrico del motor.

Estos factores influyen en las condiciones operativas del motor para los rendimientos máximos previstos, sumándose las condiciones geográficas de operación existentes. Existe una relación directa entre el flujo másico de aire del motor y el combustible requerido, denominado como la relación aire-combustible. “Los requerimientos de combustible de un

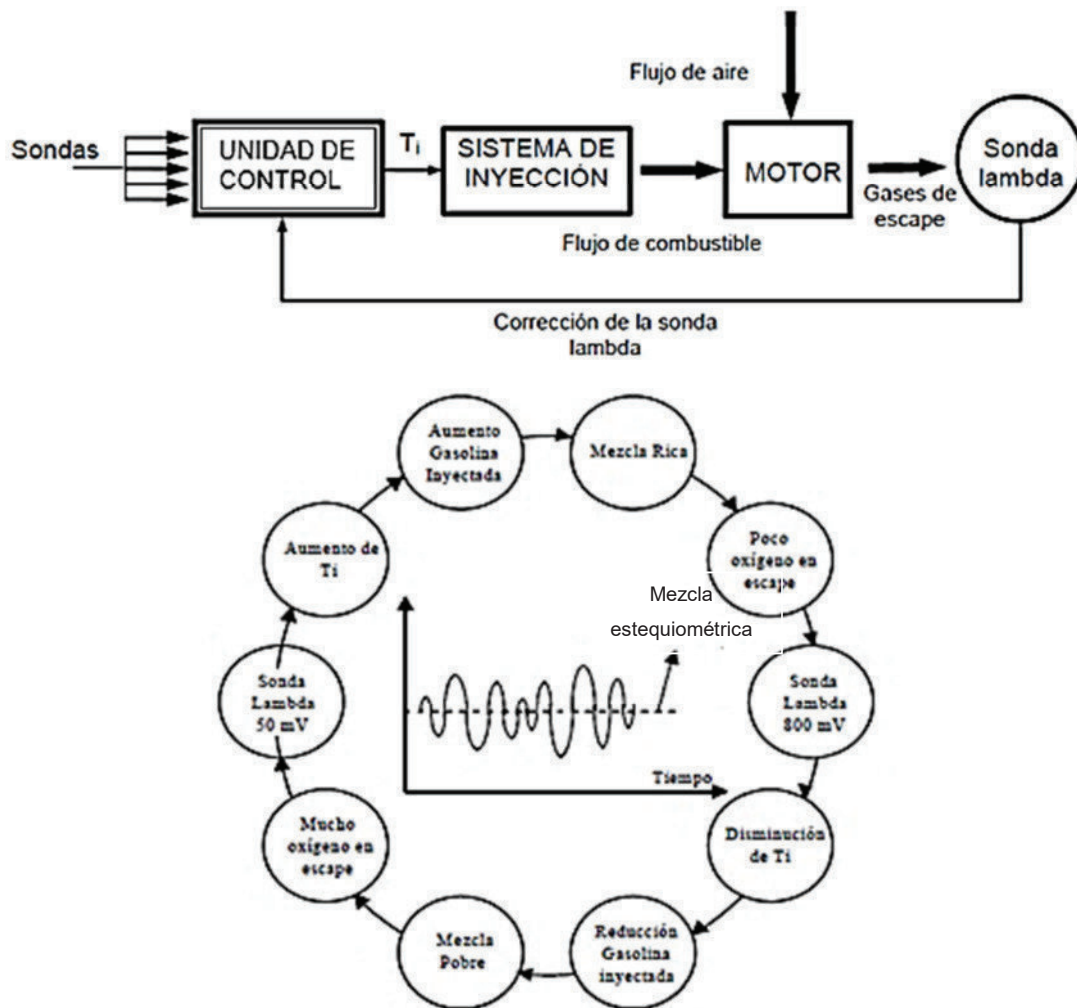


Figura 1.12. Comportamiento de la mezcla basado en la operación del parámetro de operación.
(Fuente: Antonio & Domínguez, 2015)

El mantenimiento preventivo y correctivo de los elementos que constituyen la alimentación y dosificación del combustible en el MEP, favorecen la disminución de gases contaminantes, a la vez, aumenta la probabilidad de una combustión completa, lo que reduce la formación de residuos percusores de la contaminación y degradación del lubricante.

1.5.2. Lubricación MEP

En un motor existen innumerables piezas que se mueven a gran velocidad y que rozan entre sí, debido a las rugosidades superficiales de los materiales. La lubricación consiste en introducir una película de aceite entre piezas con movimiento relativo entre sí para

disminuir al máximo el rozamiento. La lubricación sustituye el roce entre las superficies por la fricción en las capas del lubricante.

“Un lubricante tiene una serie de características importantes: viscosidad, densidad, untuosidad, acidez, puntos de inflamación y de congelación, volatilidad (noack), detergencia, dispersión y formación de espuma. Todas estas características se combinan para conseguir lubricantes de calidad” (Antonio & Domínguez, 2015).

Las operaciones más frecuentes en el circuito de lubricación del motor son las de mantenimiento: cambio del aceite y filtro. Estas operaciones de mantenimiento se realizan periódicamente en función del kilometraje en los vehículos o en función de las horas de funcionamiento en maquinaria pesada. En el caso del lubricante del motor del vehículo, el tipo de aceite se establece por el grado de viscosidad dado por la norma SAE J300 de la Sociedad Americana de Ingenieros Automotrices (SAE).

En el lubricante del motor, es necesario, establecer tres condiciones para asegurar la funcionalidad del lubricante y son los siguientes:

- **Salud**, establece las condiciones apropiadas de las propiedades físico-químicas del lubricante acorde al uso del lubricante, tales como viscosidad, número de basicidad total (TBN), índice de viscosidad, entre otros. Para la evaluación de la viscosidad, se utiliza un parámetro adimensional (Z_{visc}), que permite comparar las diferentes mediciones, utilizando la relación propuesta por (Tormos, 2006):

$$Z_{visc} = \frac{V_{medida}}{V_{original}}$$

Ecuación 1.5.

Donde:

Z_{visc} : parámetro adimensional

v_{medida} : viscosidad medida en el aceite usado [cSt]

$v_{original}$: viscosidad del aceite nuevo [cSt]

- **Contaminación**, establece la intervención de partículas externas en la funcionalidad del lubricante, generalmente, los contaminantes del lubricante provienen de tres fuentes: el ambiente que rodea a la máquina, la operación de la máquina y las actividades de mantenimiento. En el caso del vehículo es importante el estado de los filtros del motor. Adicionalmente la composición del combustible afectará al lubricante.

- **Desgaste**, esta condición del lubricante, se determinada por la salud y contaminación del lubricante. El nivel de aditivos del lubricante establece la tendencia de desgaste de los elementos del motor, según, las partículas detectadas en el monitoreo del lubricante.

1.5.3. Monitorización MEP

El motor constituye un elemento primordial de la funcionalidad del vehículo, para diagnosticar su estado general, es aplicable diversas técnicas acordes al desarrollo del mantenimiento preventivo y predictivo. El estado general del motor se analiza con base a sus prestaciones de potencia, compresión y emisiones de gases. Una herramienta de diagnóstico acorde al requerimiento de funcionalidad y prestaciones, constituye el análisis de aceite usado, logra detectar inicio de la pérdida de las propiedades del lubricante o cuando se contamina, como también las fuentes de contaminación y la tendencia de desgaste de los elementos del motor, determinando el estado del lubricante, se optimiza las operaciones del mantenimiento y los periodos de intervención.

El conocimiento del estado del aceite durante y después de su ciclo de trabajo, permite extender al máximo la vida útil del lubricante, estableciendo el periodo óptimo del cambio de lubricante y el control de las partículas de desgaste ayudado por herramientas de análisis estadístico. Según la norma ISO 17359 (Monitorización de condición y diagnóstico de máquinas), recomienda establecer una línea base de datos y proceso de recolección de información, para el caso de un motor de combustión interna sugiere el monitoreo de los siguientes parámetros: consumo de aceite, vibración y el análisis de aceites, como métodos de recolección de información para el monitoreo del MEP. La norma ISO 17359, establece las directrices para los procedimientos generales que se deben considerar al establecer un programa de monitorización de condición de máquinas. Esta norma incluye referencias a estándares asociados requeridos en este proceso aplicable a máquinas de cualquier tipo.

A través del análisis del aceite, se pueden evaluar distintos parámetros como son la oxidación, nitración, viscosidad, metales de desgaste, conteo de partículas, número total ácido (TAN), número total básico (TBN), contenido de agua, materia carbonosa, sulfatación, contaminación de glicol, agotamiento de aditivos y dilución (gasolina – diésel) entre otros, los cuales están relacionados con determinadas técnicas analíticas. El manejo de esta información permite correlacionar y predecir potenciales fallos del motor y garantizar que los aceites lubricantes sean cambiados sólo cuando es necesario, generalmente, cuando algún parámetro crítico esté fuera de especificaciones.

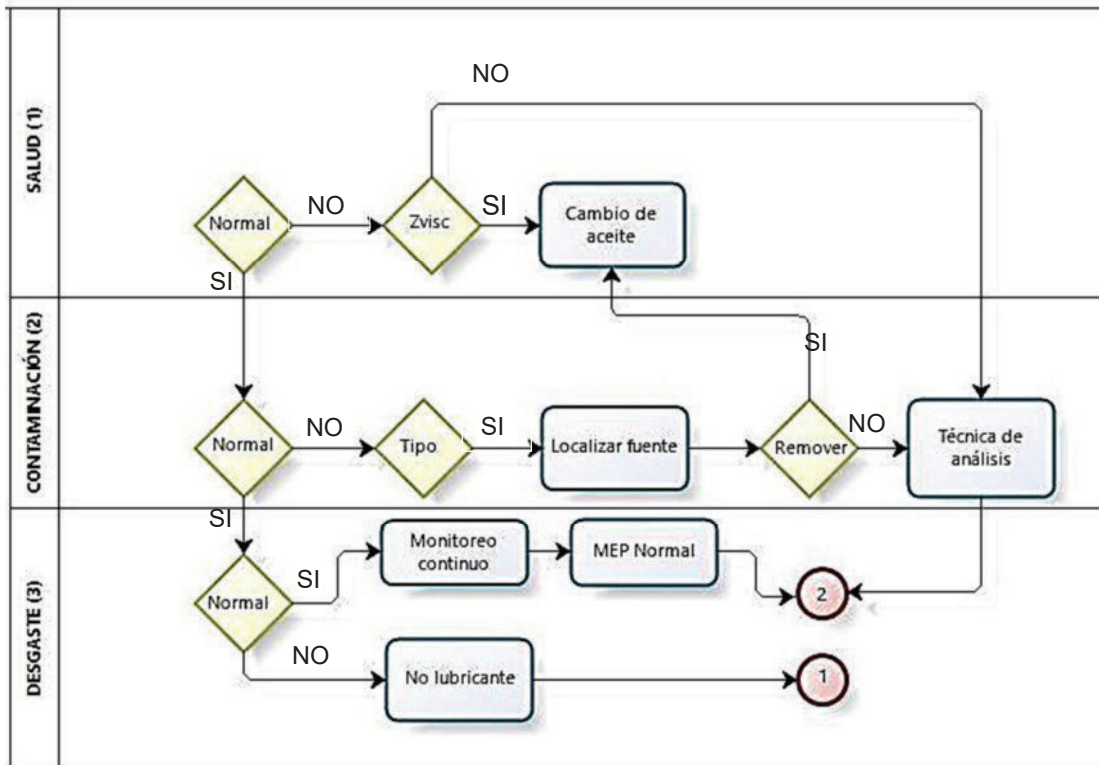


Figura 2.5. Escenario de diagnóstico del lubricante usado.

(Fuente: Autor)

2.6. Fase 3. Compilación y validación de diagnóstico

Los resultados del análisis de aceite deben ser compilados y tratados, los datos se tratan estadísticamente para determinar los valores límites de los elementos del lubricante usado.

Los datos obtenidos en los análisis de aceites se referencian con valores mínimos y máximos, denominados límites, y se crean para ayudar en la interpretación de resultados, esto permite filtrar la información tanto en el tiempo, como la tasa de cambio en cada medición. En la figura 2.6., se muestra el proceso de análisis del proceso investigativo aplicado.

En la tabla 3.2., se muestra la línea base de la potencia del motor MEP de cada vehículo de prueba, relacionándose con la potencia referida por el fabricante. Los datos de potencia medida y corregida son obtenidos en el dinamómetro, como se observa en el anexo D.

Tabla 3.2. Potencia MEP de los vehículos de prueba.

	Modelo	Potencia medida [HP]	Potencia corregida [HP]	Potencia referencia [HP]
1	Chevrolet Grand Vitara	87.5	105	126
2	Chevrolet Grand Vitara	85.5	102.6	126

(Fuente: CICEV, Manual de fabricante)

Los resultados completos de las curvas de torque-potencia, se muestran en el anexo D. En el caso del vehículo Grand Vitara, la diferencia de potencia nominal es del 16,6 %. En ambos casos la diferencia de potencia nominal a la altura de Quito es similar.

3.1.3. Inspección de componentes asociados a la operación del motor

El proceso de inspección de los vehículos de pruebas, están orientados a controlar y limitar la contaminación del lubricante del motor y el proceso de combustión, aplicando un mantenimiento proactivo sobre los componentes del sistema de inyección de combustible y el proceso de toma y cambio del lubricante del motor. En la tabla 3.3., se resume las pruebas ejecutadas y elementos del motor de los vehículos revisados, para el proceso de mantenimiento, revisión y cambio están vinculados con las recomendaciones de mantenimiento del fabricante y las condiciones de uso del vehículo.

Tabla 3.3. Condición de inspección de vehículos.

Elemento	Vehículo	
	Grand Vitara Súper	Chevrolet Grand Extra
Medición de torque y potencia	OK	OK
Cambio de filtros	OK	OK
Estado de inyectores	OK	OK
ABC Motor	OK	OK
Análisis de gases	OK	OK
Niveles de fluidos	OK	OK
Batería	OK	OK
Catalizador	OK	OK

(Fuente: Autor)

Para el registro de la información adquirida, se utiliza una serie de formatos y listas de revisión, así, como el registro fotográfico se muestran en el Anexo B.

APLICACIÓN DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO. CASO ESTUDIO: ANALISIS DE ACEITE USADO EN UN MOTOR DE COMBUSTION INTERNA

Francisco Saldivia

UNEXPO Barquisimeto, Lara, Venezuela, fsaldivi@gmail.com

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es evaluar el comportamiento del motor a través del monitoreo de las propiedades físico – químicas y contaminación del lubricante y será llevado a cabo a través pruebas de laboratorio, con las cuales se obtendrán las tendencias dependiendo del tiempo de funcionamiento del motor y se establecerán relaciones entre las propiedades que servirán para la toma de decisiones respecto al mantenimiento del equipo. El estudio se realizó en un motor de combustión interna de encendido por compresión con un procedimiento de arranque y calentamiento que consistió en el funcionamiento del motor sin carga, velocidad de ralentí. Como resultado se obtiene una medida del efecto del contenido de combustible en la estabilidad de la película lubricante a través de la viscosidad, la cual no tiene mayor influencia en los metales de desgaste ya que se mantienen controlados, al igual que los niveles de aditivación, pero obliga a actuar sobre los parámetros operativos del equipo con la finalidad de corregir el problema de la contaminación con combustible.

Palabras claves: Lubricantes, mantenimiento basado en la condición, análisis de aceites, motor de combustión interna.

ABSTRACT

The objective of this study is to evaluate the behavior of the motor by monitoring the physical - chemical properties and pollution of the lubricant and will be conducted through laboratory tests, which are obtained with trends depending on the engine operating time and establish relationships between the properties that will serve for making decisions regarding maintenance. The study was conducted in an internal combustion engine with compression ignition starting and operating procedure unloaded motor, idle speed. The result is a measure of the effect of oil content of the lubricant film stability via viscosity, which has no more influence on wear metals since they remain controlled, as levels of additives, but forces acting on the operating parameters of the equipment in order to correct the problem of fuel contamination.

Keywords: Lubricants, condition-based maintenance, oil analysis, internal combustion engine.

1. INTRODUCCION

El presente trabajo tiene como propósito el análisis de un aceite lubricante usado en motores de combustión interna a través del estudio de las propiedades físicas y químicas de dicho lubricante.

El análisis y monitoreo del aceite lubricante, brinda mayor confiabilidad acerca del estado real en el que se encuentra el motor, y previene fallas y paradas no planificadas. En los motores de combustión interna, donde el combustible es quemado, la lubricación se ve enormemente dificultada debido a los fenómenos adicionales y más exigentes a los que se debe enfrentar: altas temperaturas, productos de la combustión y residuos que pueden contaminar el lubricante, altos esfuerzos, entre otros. La metodología utilizada permite generar una referencia para estudios posteriores sobre el tema y puede ser aplicada a otros equipos.

2. MANTENIMIENTO PREDICTIVO

El mantenimiento predictivo surge como respuesta a la necesidad de reducir los costos de los métodos tradicionales de mantenimiento, preventivo y correctivo, y parte del conocimiento del estado de los equipos. Se apoya en dos pilares fundamentales (Cesáreo, 1998) que son la existencia de parámetros funcionales indicadores del estado del equipo y la vigilancia continua de los equipos, con la finalidad de detectar la falla antes de que ocurra para asegurar el correcto funcionamiento, observar su evolución y predecir la vida residual de sus componentes.

La dificultad de implantar este tipo de mantenimiento (González, 2005) radica en la localización de la variable identificadora y en correlacionar niveles de aceptación o rechazo de dicha variable con estados reales de la máquina fácilmente medibles. Debe verse complementado por la utilización de técnicas estadísticas a través de la medición rigurosa de variables y tratamiento de dichas medidas.

El mantenimiento predictivo basado en el análisis de aceite es un método que ayuda a determinar los períodos óptimos de sustitución del lubricante y las causas que estén originando su degradación y contaminación.

3. ANÁLISIS DE ACEITE

El monitoreo de los aceites (Albarracín, 1993) es una de las herramientas más valiosas que el ingeniero de mantenimiento tiene a su disposición con la finalidad de alcanzar la vida útil de los equipos mecánicos. Las diferentes técnicas para el monitoreo periódico de los aceites usados como el análisis físico-químico, la espectrofotometría por emisión atómica, el conteo de partículas y la ferrografía permiten evaluar el estado del aceite para su cambio oportuno y el grado de desgaste de los diferentes mecanismos del equipo, el cual si es anormal permitirá implementar correctivos que eviten la parada no programada o en caso contrario trabajar con confiabilidad y cuantificar la vida real de servicio del equipo que debe estar de acuerdo con lo especificado por el fabricante. Los resultados finales se reflejarán en una reducción significativa de los costos de mantenimiento.

Un programa moderno de análisis de aceite (Trujillo, 2007) debe ser considerado como una cadena donde la integridad y la fortaleza de cada eslabón (selección de la localización óptima del puerto de muestra, frecuencia adecuada, selección de las pruebas a realizar, adecuado análisis y la interpretación realizada por personal especializado) es idéntica, es la herramienta efectiva para incrementar la confiabilidad de la maquinaria. Ese programa utiliza la tecnología, los conocimientos de la operación del equipo y los resultados del análisis de aceite para establecer acciones específicas de mantenimiento y permitir una lubricación óptima.

4. MUESTREO, LÍMITES Y ALARMAS

La toma de muestra es el aspecto más crítico del análisis de aceite (Troyer y Fitch, 2004). Si no se obtiene una muestra representativa, todos los esfuerzos subsecuentes del análisis de aceite serán anulados. Los objetivos principales para la obtención de una muestra representativa son:

1. Maximizar la densidad de información. Obtener la mayor cantidad posible de información por mililitro de aceite.
2. Minimizar la distorsión de información. La concentración de información debe ser uniforme, consistente y representativa. Es importante que la muestra no se contamine durante el proceso de muestreo.

Los límites en análisis de aceite a veces son denominados alarmas (Mayer, 2005), y son dispositivos creados para ayudar en la interpretación de los informes. Si bien varios parámetros pueden superar una cantidad determinada, en otros se espera que cambien con el tiempo, pero su tasa de cambio sigue siendo importante.

El propósito principal de las alarmas o límites es filtrar la información para que el analista invierta su tiempo en administrar y corregir situaciones excepcionales en vez de tener que examinar atentamente toda la información tratando de encontrar las excepciones.

Algunos parámetros de información solo tienen límites superiores como los niveles de partículas de desgaste o los contadores de partículas, otros parámetros de información disponen de límites inferiores, como: basicidad,

metales de aditivos y punto de inflamación. Y otros parámetros de información tienen ambos límites, como viscosidad.

Las alarmas pueden ser absolutas o estadísticas (Mayer, 2005b), las absolutas son límites condenatorios que se aplican al estado de contaminación del lubricante, y se pueden tomar las recomendaciones del fabricante del equipo, en el caso que las hubiera o en su defecto las recomendaciones del Laboratorio de Análisis de Lubricantes, mientras que las alarmas estadísticas están basadas en los propios valores registrados en el equipo. El análisis de la tendencia estadística permite identificar fallas incipientes.

5. PROCEDIMIENTO

Se seleccionó un motor de combustión interna (MCI) de encendido por compresión que está instalado en el Laboratorio de Lubricantes y Combustibles de la UNEXPO Vicerrectorado Barquisimeto, y sus especificaciones aparecen en la tabla 1.

Tabla 1. Especificaciones técnicas del motor

Marca: Isuzu	Relación de compresión: 17.5:1
Modelo: 4BD1	Método de lubricación: Presión por circulación
No. de cilindros: 4	Tipo de bomba de aceite: Engranajes
Desplazamiento (litros): 3.856	Tipo de filtro de aceite: Cartucho de filtro de papel
Diámetro del cilindro (mm): 102	Capacidad de aceite: 7,5 litros
Carrera (mm): 118	Tipo de bomba de agua: Centrifuga

Fuente: <http://www.diesel-engine.cn/isuzu/4bd1.htm>

El motor emplea un aceite lubricante multigrado 15W40 de la marca Venoco calidad CL-4 de base mineral, el cual cumple con los requerimientos según criterios de desempeño CATERPILLAR 1N, SEQUENCE IIIF, CUMMINS CES 20071, 20072, 20076, 20077, 20078, VOLVO VDS-2, ACEA E5/B4, MAN 3275, MB 228.3, MACK T-8 y MACK EO-M PLUS. Ver propiedades físico-químicas en tabla 2.

Tabla N° 2. Propiedades físico – químicas del aceite Venoco CI-4 / SL

Grado SAE	15W40	Índice de viscosidad	142
Gravedad específica a 15°C	0.882	T.B.N., mg KOH/gr	12
Viscosidad a 40°C, cSt	104	Punto de inflamación, °C	220
Viscosidad a 100°C, cSt	14.4		

Fuente: Industrias Venoco

El motor fué sometido a funcionamiento sin carga por un tiempo total interrumpido de 150 horas. La carga, velocidad de trabajo (rpm) y la temperatura del motor se mantuvieron constantes.

Para la toma de la muestra, inicialmente se realizó la limpieza del puerto de toma de la muestra de aceite, luego se tomó la muestra y se trasegó a un recipiente de plástico transparente de 120 ml de capacidad que cuenta con una tapa hermética. La identificación del recipiente se realiza con una etiqueta con la siguiente información: Cliente, unidad, código de la unidad, fecha de la toma, tipo de aceite, horas del aceite, horas de la unidad, observaciones relevantes sobre las características del equipo rotativo y del proceso, con el fin de que las recomendaciones que se den con respecto al estado del aceite sean los más precisas posibles.

La muestra de aceite se extrajo por el conducto donde está ubicada la varilla de medición de nivel de aceite del motor. El volumen a recolectar en cada muestra es de 110 ml y para ello se utilizó una manguera de plástico transparente, una bomba de succión tipo vampiro y un recipiente de plástico. Se estableció realizar la toma de muestra de aceite en intervalos de 15 horas y la muestra identificada con el número 1 corresponde al aceite virgen (sin uso).

Las propiedades físico-químicas seleccionadas para este estudio, son:

- Viscosidad Cinemática. Normas ASTM D 445.
- Número total de basicidad y de acidez. Normas ASTM D 4739 / ASTM D 664.
- Infrarrojo en aceites usados. Norma NVE 751: Oxidación, Agua, Sulfatación, Nitración, Combustible, Hollín.
- Contenido de metales por espectrometría. Metales de desgaste, metales de contaminación y metales de aditivo. Norma ASTM D 6595.
- Mancha de aceite.

6. RESULTADOS

En este trabajo se mostrarán las figuras correspondientes a los comportamientos de cada una de las variables en estudio y no los valores tabulados, esto por cuestiones de espacio. De requerirse mayor información, consultar (Saldivia, 2013).

En la Figura 1 se presenta la distribución de valores de viscosidad, en Centistokes, para las muestras obtenidas según el número de horas de operación del motor.

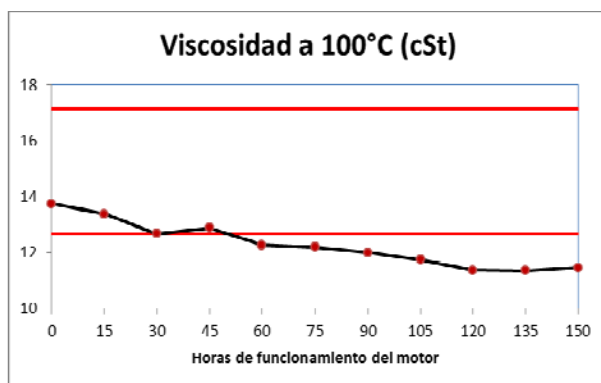


Figura 1: Valores obtenidos de viscosidad

Los resultados muestran una disminución progresiva de la viscosidad en la medida en que va aumentando el número de horas de operación del motor, incluyendo un punto de corte al transcurrir un 33% del período de prueba, aprox. (un poco por encima de las 45 horas) con la línea correspondiente al límite inferior de control. Este resultado puede ser debido a:

- Dilución con aceite menos viscoso
- Contaminación por combustible
- Rotura de polímeros por cizallamiento.
- Cizallamiento o rotura del aceite base.

Esto trae como consecuencia una disminución de la protección de las superficies metálicas y por consiguiente un incremento del desgaste de las superficies. El límite superior de control corresponde a 17,14 cSt y el límite inferior de control 12,66 cSt.

La figura 2 muestra la distribución de valores de TBN, en miligramos de Hidróxido de Potasio por gramo de aceite usado (mg HOH/g), para las muestras obtenidas según el número de horas de operación del motor.

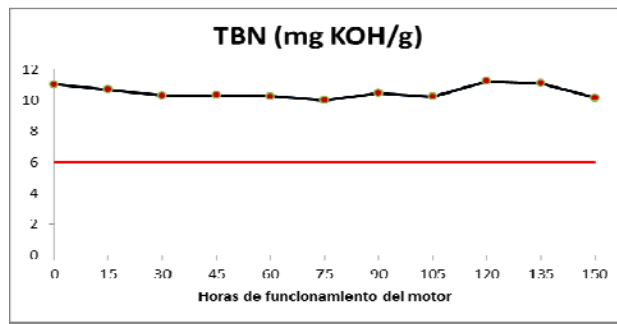


Figura 2: Valores obtenidos de basicidad

La basicidad se mantiene en valores aproximadamente constantes y alejados del valor mínimo permitido, 6, en la medida en que va aumentando el número de horas del motor. Esto es reflejo de que se mantiene la reserva alcalina del aceite lubricante el cual es un indicador de su capacidad detergente – dispersante.

La figura 3 refleja la distribución de valores de Oxidación, en (A/cm), para las muestras obtenidas según el número de horas de operación del motor.

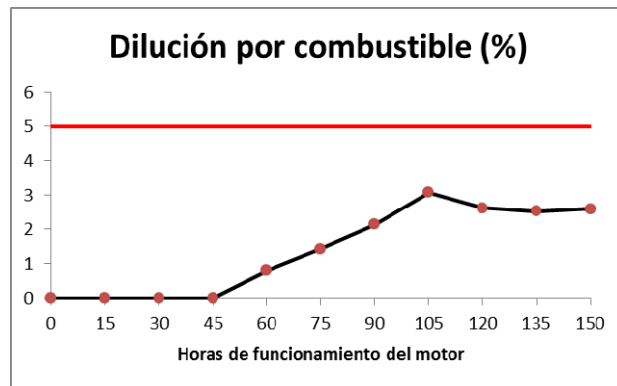


Figura 3: Valores obtenidos de dilución por combustible

A partir de las 45 horas de funcionamiento del motor, en los resultados de los análisis aparece contaminación por combustible la cual progresivamente se va incrementando sin alcanzar el máximo permitido 5%. Esta contaminación puede ser debida a problemas de inyectores (calibración o fugas), problemas de combustión (mezcla rica en combustible que no se quema totalmente), viajes cortos, marcha en vacío, etc.

En la figura 4 se presenta la distribución de valores del contenido de hollín, en (A/cm), para las muestras obtenidas según el número de horas de operación del motor.

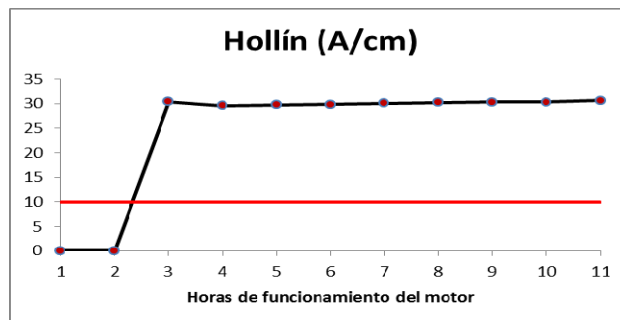


Figura 4: Valores obtenidos de contenido de hollín

Se presenta un aumento considerable de la cantidad de hollín en el aceite, lo que es un indicativo de que hay una combustión incompleta. Las consecuencias de tener un alto contenido de hollín son espesamiento del aceite y aumento de la tasa de desgaste en el motor.

La figura 5 ilustra la distribución de valores de metales por desgaste, en partes por millón (ppm), para las muestras obtenidas según el número de horas de operación del motor.

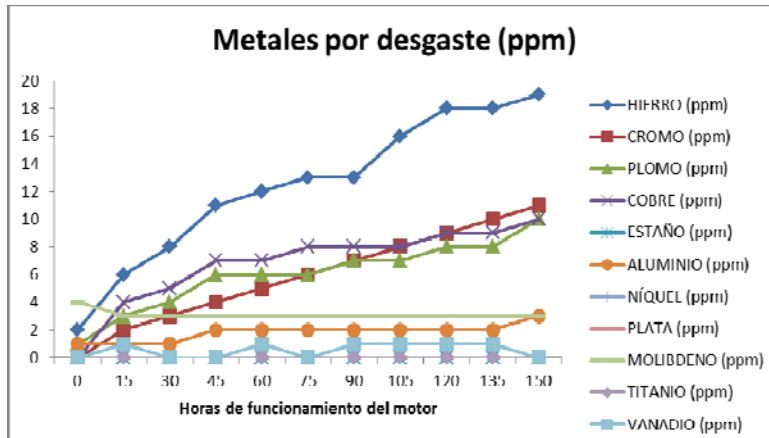


Figura 5: Valores obtenidos de metales de desgaste

Los valores máximos permisibles de metales de desgaste, en ppm, para cada uno son: Hierro 100, Cromo 15, Plomo 40, Cobre 45, Estaño 20, Aluminio 20. Se consiguen trazas de Níquel, Plata, Molibdeno y Vanadio. En el comportamiento se observa un incremento progresivo para la mayoría de los metales, lo cual es de esperarse debido a su acumulación en el tiempo, no alcanzando los valores máximos permisibles, significando que el aditivo antidesgaste está cumpliendo con su función. En otros casos hay oscilaciones muy pequeñas alrededor de un número, lo que puede ser debido a error en la precisión del equipo.

Los metales por contaminación son aquellos que ingresan al motor y provienen del medio ambiente. La figura 6 muestra la distribución de valores de metales por contaminación, en partes por millón (ppm), para las muestras obtenidas según el número de horas de operación del motor.

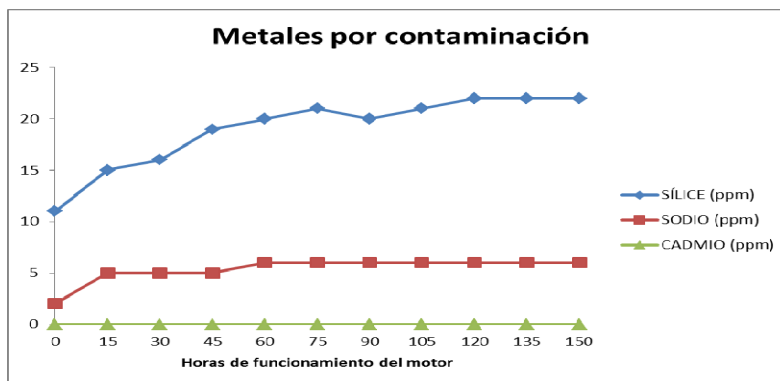


Figura 6: Valores obtenidos de metales de contaminación

Los valores máximos permisibles, en ppm, para cada uno de los metales son: Sílice 15, Sodio 30. En el comportamiento se observa un incremento progresivo, lo cual es de esperarse debido a su acumulación en el tiempo, alcanzando el sílice su valor máximo permisible. El Silicio en una muestra de aceite puede representar desgaste de sellos y estoperas, aditivos del aceite como antiespumante (por eso se requiere una muestra del aceite virgen para comparar los resultados), o ingreso de tierra por el filtro de aire o alguna parte del sistema de alimentación del aire. La tierra que ingresa actúa como lija y desgasta las camisas, los anillos y todo donde existe fricción y entra en contacto con el aceite. Este aire debe ser totalmente puro y libre de contaminantes.

Los metales por aditivos reflejan el nivel de actividad que mantienen para que el aceite siga cumpliendo con sus funciones. En la figura 7 se observan los valores de metales por aditivo, en partes por millón (ppm), para las muestras obtenidas según el número de horas de operación del motor

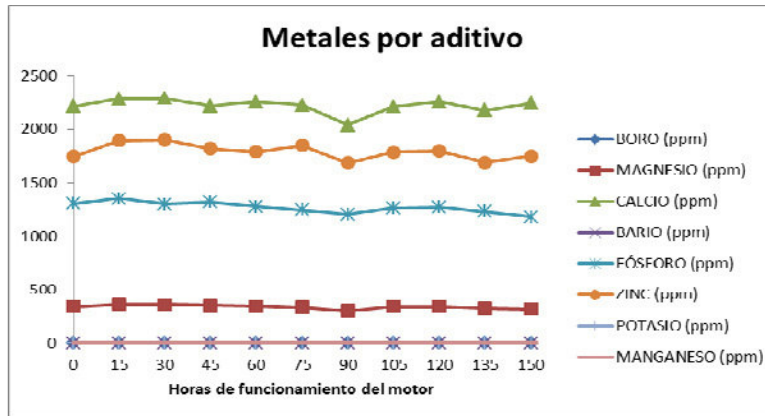


Figura 7: Valores obtenidos de metales por aditivo

Se observa que los valores obtenidos son aceptables tomando en cuenta que los valores mínimos permisibles, en ppm, para cada uno de los metales son: Calcio 1750, Zinc 1400, Fósforo 1000. Para el caso de Boro, Magnesio, Bario, Potasio, Manganeso, los valores obtenidos son bajos. El Calcio y el Magnesio son aditivos detergentes/dispersantes y son utilizados para combatir el hollín, neutralizar los ácidos formados por la humedad en la combustión, mantener los contaminantes y lodos en suspensión hasta llegar al filtro, sin dejar que se aglomeren y formen grumos, ni que se adhieran a las superficies metálicas. El Zinc y el Fósforo proveen la protección antidesgaste a través de la lubricación límite formando capas para evitar el contacto metal-metal. La mayoría de la variación que se observa en el aceite usado es lo quemado o evaporado. Mientras menos hollín, menos deterioro del Zinc y el Fósforo.

Para la ejecución del ensayo de la gota de aceite se utilizó el papel de filtro Whatman #5 y con un gotero se depositaron en él dos gotas de aceite. Se sometió a un proceso de secado en una plancha eléctrica a una temperatura de 200 °C. Las manchas obtenidas se muestran en la figura 8.

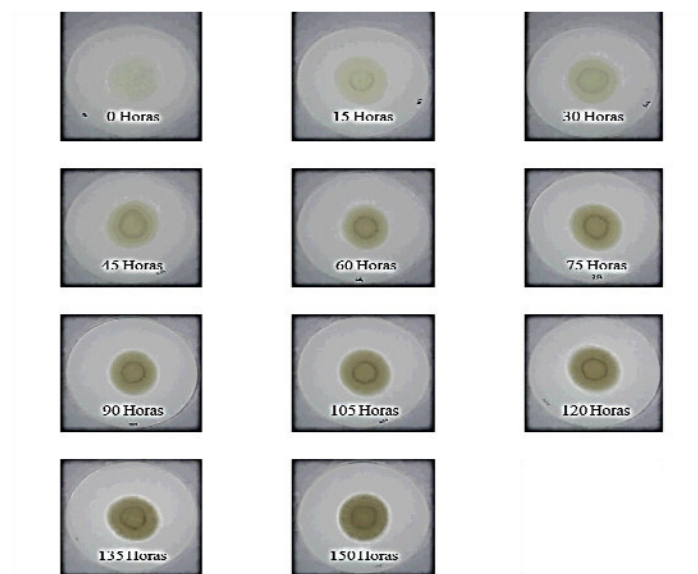


Figura 8. Resultados obtenidos con la gota de aceite.

De los resultados obtenidos de la prueba de la gota de aceite (mancha de aceite), se observa la forma progresiva en que ésta se va oscureciendo en la medida en que va aumentando el número de horas de trabajo del motor. Este comportamiento es normal debido al incremento del contenido de hollín e indica suciedad del aceite. En la parte externa de las manchas se observa un cambio en la coloración con respecto al resto de la imagen. Esto es indicativo de niveles de oxidación del aceite.

En todas las muestras de aceite usado, a partir de las 15 horas, se observa una aureola muy bien definida aproximadamente en el centro de la mancha la cual se va oscureciendo con el incremento de las horas de operación del motor. Esto representa la contaminación con combustible que tiene el aceite, coincidiendo con lo obtenido en el resultado de la dilución con combustible.

De los resultados obtenidos, evaluando en forma individual cada propiedad en función del número de horas de trabajo del motor, se tiene que las que están fuera de sus límites son la viscosidad y el contenido de hollín, y un incremento progresivo en la dilución por combustible. Estos resultados y para complementar el estudio, deben ir acompañados de un seguimiento a los parámetros operativos del funcionamiento del motor, a saber: temperatura de trabajo, carga de trabajo, revoluciones por minuto, los cuales incidirán directamente en la vida útil del lubricante, los cuales se mantuvieron constantes en el tiempo.

Las variables que están dentro de límite no representan, hasta ahora, riesgo para el funcionamiento de los componentes del motor.

Hay propiedades físico-químicas del aceite lubricante que de alguna manera modifican el comportamiento de otras, y entre ellas están:

1. Contenido de combustible y viscosidad. Ver figura 9.

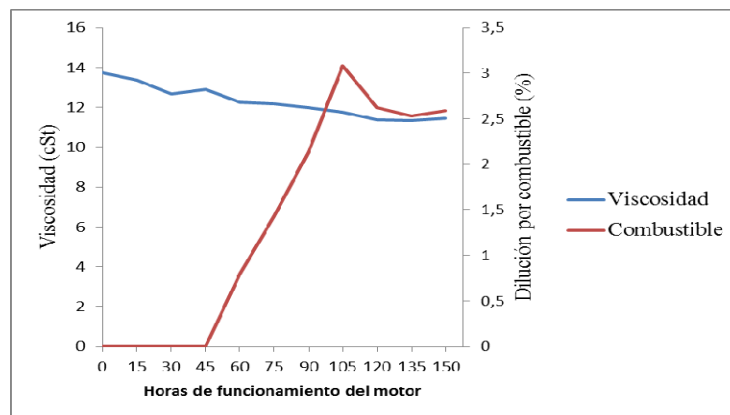


Figura 9: Viscosidad y Dilución por combustible vs. Horas de operación

En la medida que aumenta el contenido de combustible, sin exceder el máximo permisible 5%, en las muestras de aceite en función de las horas de trabajo, se presenta una disminución en la viscosidad que está por debajo del valor mínimo permisible 12.66 cSt. Esto debido a que como el combustible es compatible con el aceite lubricante mineral, actúa como un diluyente lo que debilita la estabilidad de la película lubricante.

2. La figura 10 muestra el contenido de combustible y su incidencia en el contenido de hollín en el aceite lubricante en función del número de horas de operación del motor.

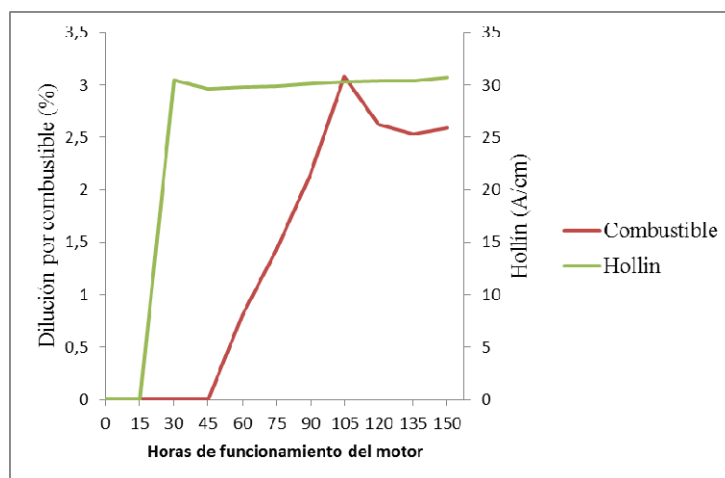


Figura 10: Dilución por combustible y Hollín vs. Horas de operación

La combustión que se está presentando en el motor es incompleta ya que aparecen en el aceite trazas o restos del combustible utilizado, en este caso Diesel. Un elevado contenido de hollín es el resultado de este comportamiento. Aunque el contenido de hollín es uno de los factores que incrementa la viscosidad del aceite lubricante, se tiene que ésta disminuye debido a que el efecto del contenido de combustible es mayor.

3. Viscosidad y contenido de metales de desgaste

La figura 11 muestra la viscosidad (estabilidad de la película lubricante) y su incidencia en el contenido de los metales de desgaste más representativos en el aceite lubricante en función del número de horas de operación del motor.

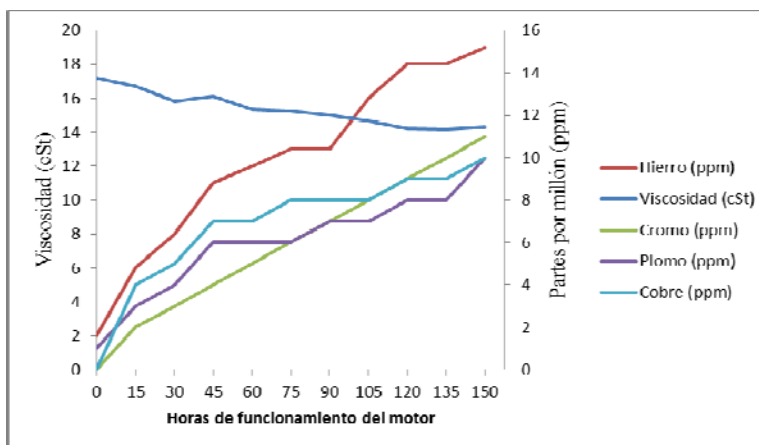


Figura 11: Viscosidad y metales de desgaste vs. Horas de operación

En la medida que transcurre el funcionamiento del motor se observa un comportamiento lógico en cuanto al incremento del contenido de los metales de desgaste hasta valores que se consideran aceptables. También se observa una disminución de la viscosidad del aceite lubricante la cual es considerada la principal propiedad.

CONCLUSIONES

- De los resultados obtenidos se puede establecer que el control parámetros de seguimiento, características físico-químicas y de la concentración de metales del aceite lubricante en los aceites usados a través del control estadístico de tendencias, permite la detección temprana de niveles de contaminación; determinando el periodo de relleno o reemplazo del aceite lubricante en el motor Diesel.

- La disminución de la viscosidad por debajo del valor mínimo permisible es un indicio del debilitamiento en la estabilidad de la película lubricante y por ende, deficiencia en la protección de las superficies metálicas, sin embargo, el reporte del contenido de metales por espectrometría refleja que todos los metales se encuentran por debajo de sus valores máximos permisibles, lo que indudablemente establece que no se ha visto afectada la acción del aditivo antidesgaste.
- A través de los resultados obtenidos se han detectado problemas en la combustión del motor debidos al exceso de combustible que no se quema y pasa a contaminar el aceite lubricante con la consecuencia reflejada en la disminución de la viscosidad y por ende, la disminución de la protección sobre las superficies de los metales de los elementos de máquinas que están en movimiento. Por ello, es conveniente efectuar una calibración de los inyectores y la bomba de inyección para corregir posibles anomalías.
- La técnica de mantenimiento predictivo utilizada, análisis de aceite, constituye un meticuloso chequeo de los sistemas vitales de la máquina, en el que se analiza el aceite del motor y ofrecen avisos con antelación, lo que le da tiempo para cambiar componentes antes de que causen problemas y otros daños.

7. REFERENCIAS

- Albarracín, P. (1993). “Tribología y Lubricación Industrial y Automotriz”, Tomo I, 2da. Edición. Colombia.
- Cesáreo, F. (1998) “Tecnología del Mantenimiento Industrial”. Servicio de Publicaciones, Universidad de Murcia. España.
- Fitch, J. Trad: Trujillo, G. (2002). “Guía de procedencia de elementos para aceite usado”. Ed. Noria. México.
- González, F. (2005). “Teoría y práctica del mantenimiento industrial avanzado”. 2 ed. Fundación Confemetal. España.
- Mayer, A. (2005). “Set Oil Analysis Limits Correctly”. *Revista Practicing Oil Analysis*. Noria Corporation
- Saldivia, F. (2013). “Comportamiento de las propiedades físico-químicas de un aceite lubricante usado en un motor de combustión interna”. *Trabajo de ascenso*. UNEXPO Barquisimeto.
- Troyer, D., Fitch, J. (2004). “Oil Analysis Basics”. Noria
- Trujillo, G. (Abril - Mayo 2007). “Análisis de aceite, una estrategia proactiva y predictiva”. *Revista Machinery Lubrication en Español*. Noria Corporation.

Autorización y Renuncia

Los autores autorizan a LACCEI para publicar el escrito en las memorias de la conferencia. LACCEI o los editores no son responsables ni por el contenido ni por las implicaciones de lo que esta expresado en el escrito.

Authorization and Disclaimer

Authors authorize LACCEI to publish the paper in the conference proceedings. Neither LACCEI nor the editors are responsible either for the content or for the implications of what is expressed in the paper.

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 herra-

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



ÁVEL OLIVERES

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 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

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,

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.

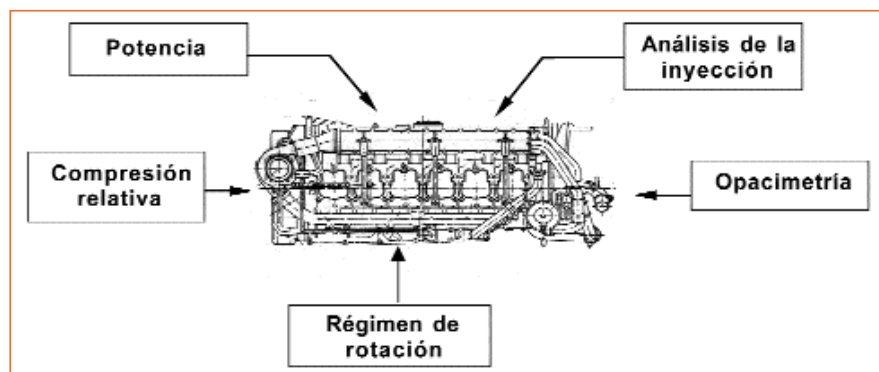


Figura 2. Esquema de técnicas de monitorizado de un motor.

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 de freno.
- 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 dónde 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 sufrieran averías ni intervenciones entre dos gamas, si no se quedarán 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	VENTAJAS	INCONVENIENTES
ALINEACIÓN DIRECCIÓN	Placa alineadora	– Valor cuantitativo	– Coste instalación
FUERZA DE FRENADO	Frenómetro		
HOLGURAS TIMONERÍA	Placa de holguras	– Rápido, sencillo	

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.

- *Almacenamiento de operaciones correctivas.*

– *Control del material de repuesto.* Para evitar operaciones pendientes por falta de material.

- *Listados de informes a la carta.* Debe

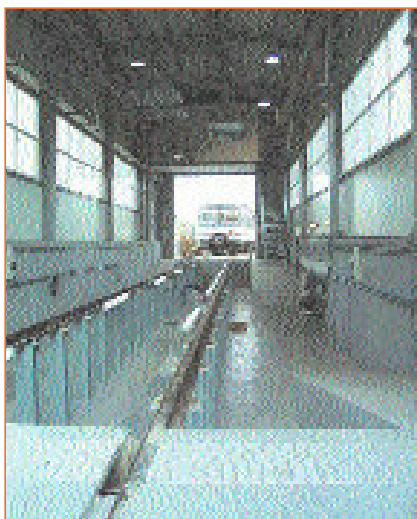


Figura 5. Centro de Diagnóstico de Automotores de Valencia.

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

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-

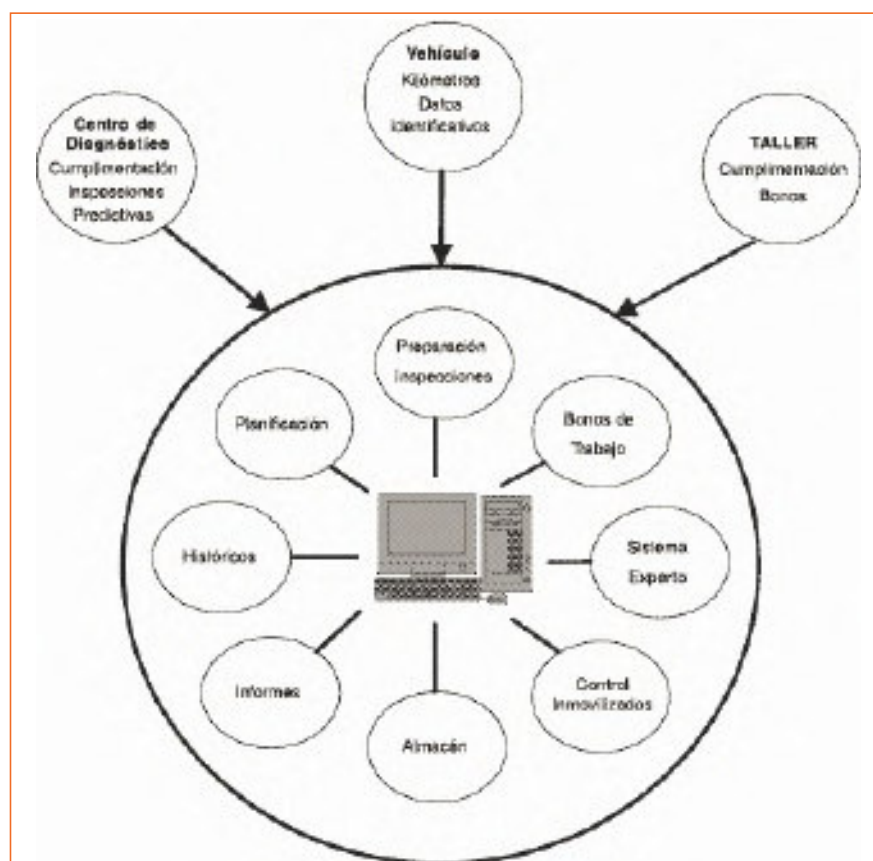


Figura 6. Flujos de información de un sistema GMAO.

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.
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.

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 todas 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.
- Jerma 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*

transporte urbano. Jornadas Técnicas de ATUC y STEM TUC. 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.

Tormos Martínez, B.; Jerma Peris, M.J.; Olmeda González, P. Anubla Lucía, E. *Diseño de un sistema de mantenimiento predictivo de motores diesel de ferrocarril*. XIV Congreso de Ingeniería Mecánica, 2000.

AUTORES

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

pabolgon@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.

An Optimization Approach to Fuzzy Diagnosis: Oil Analysis Application

Antonio Sala, *Member, IEEE*, Julio C. Ramírez *Member, IEEE*, Bernardo Tormos, Manuel Yago

Abstract— This paper discusses a knowledge-base encoding methodology for diagnostic tasks. It transform “expert”-provided rules into algebraic expressions so inference of the “possible” disorders is carried out via associated constrained optimisation problems. In this way, the need of conventional fuzzy inference systems or “uncertain”-logic schemes is no longer present in the particular setting in this paper. An oil-analysis diagnosis case study is presented as an application example, with actual experimental data. The problem is solved by efficient linear programming tools, in principle able to cope with large-scale problems. The only software used was *Mathematica*[®] 5.2.

I. INTRODUCTION

Diagnosis is the process of inferring *disorders* from measurements which denote departure from “normal” behaviour of a particular system. The result of the diagnosis process is the estimated degree of presence (severity) of each disorder, which may be expressed by a “yes/no” value or by continuously graded results (fuzzy diagnosis). Different approaches to the problem appear in literature: data-based, knowledge-based or based on differential-equation analytical models (see [1], [2]). The whole problem is possibly intractable unless simplifying assumptions are stated, as it is the case below.

In many practical cases, diagnostic-related knowledge is available from experts, who emit statements such as “Combustion problems produces abnormal soot in oil and an increase of its viscosity”, *i.e.*, rules involving fuzzy concepts. This fact inspires the use of fuzzy logic in diagnosis [3]. Other knowledge-based frameworks extend the basic logic reasoning schemes to handle uncertainty in the knowledge base via approximate reasoning[4], possibilistic and abductive reasoning [5], [6], Bayesian networks [7], *etc.*

In particular, the knowledge from experts in the field (the third author) in the oil-analysis diagnosis application to be discussed may be encoded in terms of the above fuzzy rules. Engine oil analysis has been widely used around the world as a suitable tool for condition monitoring, obtaining benefits associated with it: maintenance costs reduction, improving reliability and productivity, in different industry areas such as railways, airlines, large fleets, *etc.*

Antonio Sala and Manuel Yago are with the Industrial Automation and Informatics Institute, Systems Engineering and Control Department, Universidad Politécnica de Valencia, SPAIN, email: asala@isa.upv.es, maya-mar@upvnet.upv.es.

Julio C. Ramírez is with Electronic Engineering Department, Instituto Tecnológico de Nogales, MEXICO email: juliorv@prodigy.net.mx

Bernardo Tormos is with the CMT Thermal Engines group, Universidad Politécnica de Valencia, SPAIN . email: betormos@mot.upv.es

Antonio Sala, Bernardo Tormos and Manuel Yago acknowledge the financial support of the Spanish Ministry of Science and Technology project FEDER/MEC DPI2004-07332-(C01 and C02).

Used oil analysis is comparable to a medical analysis with a blood test. Like blood, lubricating oil contains a good deal of information about the envelope in which it circulates. However, the critical factor in oil analysis is the interpretation of the oil analysis results. A diagnostician interprets the oil test and produces a concise summary of the engine and oil condition. The oil analysis interpretation should include a discussion of the equipment wear state, level of oil contamination, oil condition and a recommendation outlining any corrective maintenance actions that are necessary. Automated decision-aid tools are needed as users increase oil analysis programmes, increase the frequency of sampling and add more sophisticated tests to the analysis.

This work uses for the above task a knowledge encoding methodology which uses standard off-the-shelf optimisation software. The methodology outlined here draws on the ideas in [8], [9]: instead of encoding knowledge as lists of logic assertions, knowledge will be equivalently encoded as equality and inequality constraints. Then, covering explanations (consistent diagnostics) [10], [11] will be understood as the feasible solutions of the above set of constraints representing knowledge and facts. Extension to the fuzzy case (gradual intensity of presence of disorders and manifestations) in the presented framework is trivial, by just considering the search space for decision variables to be the interval [0,1] instead of the two extremes considered in a binary case.

The main advantages of the methodology are: (a) the ability to use well-known optimisation techniques with fast commercial software able to handle thousands of decision variables, (b) the incorporation of “fuzziness” (understood as gradation in symptoms and disorders) in a natural way, (c) the ability to naturally handle multiple faults (selecting, if desired, the most *a priori* likely one).

The structure of the paper is as follows: next section will introduce the basic concepts and definitions. Section III will discuss how to translate expert assertions into equations and Section IV will present a detailed example of such translation applying it to a real-life oil-analysis setup.

II. BASIC DEFINITIONS

The key elements in the diagnostic system are disorders, manifestations (caused by the disorders) and observations (of some of the manifestations). The relationships between disorders and manifestations constitutes the knowledge base.

Disorders. Let us consider a set of q basic single disorders $D = \{d_1, d_2, \dots, d_q\}$ which may be present in a diagnosed system (with the possibility of simultaneous presence of

several disorders). Each disorder's "severity" may be conceived as a real number denoting presence ($d_i = 1$), absence ($d_i = 0$), or partial degree of presence with a *fuzzy* severity ($0 \leq d_i \leq 1$). Usually, each disorder has a linguistic label associated to it.

Manifestations. The possible manifestations (symptoms) of the above disorders will be $M = \{m_1, \dots, m_n\}$ where each m_i , has an associated "intensity of presence" denoting its absence ($m_i = 0$), full presence ($m_i = 1$), or partial degree of presence $0 \leq m_i \leq 1$.

Observations. For each diagnostic case, some of the manifestations will be observed (i.e., measured). Measuring m_j will be defined as obtaining an assertion "manifestation m_j takes the value σ_j ". Uncertain observations will be later considered.

The objective of diagnosis is estimating the actual disorder severities, D , from the *observations* and prior *knowledge* (possibly uncertain) about the map $D \rightarrow M$ expressing which manifestations are caused for a given disorder state D . Following [9], the goal is to express knowledge as a set of *constraints* on D and M , involving as well some auxiliary variables.

Note that, in the above interpretation, fuzziness in disorders and manifestations refers to "gradation" in fulfilment of some properties (expressed linguistically) and not to "uncertainty" or "possibility". Uncertainty in the knowledge base or the observations will be incorporated by relaxing some restrictions via artificial variables (Section III-B).

III. FUZZY DIAGNOSTIC METHODOLOGY

The basic building block of diagnostic knowledge is formed by "associations" from disorders to symptoms. Following [11], given a disorder d_i , the set of manifestations known to be caused by d_i alone will be denoted as $M(d_i)^+$, and those known to be certainly absent when d alone is present will be denoted as $M(d_i)^-$. The *normal situation* will be associated to all manifestations m_j being equal to zero (changing the definitions of some manifestations by its logic negation, if needed).

In the above discussed context, a collection of *fuzzy* sets mapping the manifestations and observations to the interval $[0, 1]$ are assumed to be defined by an expert on the system to be diagnosed. Usually, those sets are denoted by user-defined linguistic labels.

Then, the expert also knows which effects each fault has in the measurements. This knowledge is usually expressed in terms of rules:

If the isolated disorder d_i occurs, then abnormal manifestations m_{i_1}, \dots, m_{i_p} should be observed, being the rest normal

Those rules, in a fuzzy context, may be basically understood as

If the *severity* of disorder i is d_i , $0 \leq d_i \leq 1$, and it is the only fault occurring in the system, then the intensity of manifestations m_{i_1}, \dots, m_{i_p}

is approximately d_i , and the intensity of the rest of them is zero.

where $d_i = 0$ denotes fault not occurring and $d_i = 1$ denotes the fault occurring at a very significant severity level requiring user attention, and the intensity of the symptoms is the membership function of the suitably defined fuzzy concepts. There may be some cases in which the appearance or not of a particular manifestation associated to a fault is "uncertain" (depending on other faults or unknown conditions).

Hence, the following set of constraints will be used to encode knowledge.

Disorder-manifestation association. The association between disorder d_i and manifestation m_j will be expressed by an auxiliary "association variable", denoted as s_i^j , fulfilling the following constraints:

- If manifestation m_j is certain to be caused by d_i when d_i alone is present ($m_j \in M(d_i)^+$), s_i^j will fulfill, by definition, the equality constraint:

$$s_i^j = d_i \quad (1)$$

- If manifestation m_j will certainly be absent when d_i alone is present ($m_j \in M(d_i)^-$), then

$$s_i^j = 0 \quad (2)$$

- If presence or absence of manifestation m_j when d_i is present is uncertain, i.e., $m_j \in U(d_i)$, $U(d_i) = \neg(M(d_i)^+ \cup M(d_i)^-)$, the following restriction on s_i^j will be added:

$$s_i^j \leq d_i \quad (3)$$

indicating that in a "normal" situation m_j is absent, but under d_i it is sometimes present.

Superposition. Once restrictions on the relationship coefficients s_i^j have been set up, the inferred state of presence or absence of a manifestation m_j will be given by:

$$s_i^j \leq m_j \quad \forall i \quad (4)$$

$$m_j \leq \sum_i s_i^j \quad (5)$$

The first equation indicates that the manifestation intensity is greater or equal to the severity of the disorders causing it; the second one indicates that at least one of the disorders must be present for m_j to be nonzero. In this context, the interpretation of $s_i^j = 1$ is " d_i is present and causing m_j ".

In some cases, the symptoms produced by the combined occurrence of several disorders may be different to the union of those expected from the individual disorders. The introduction of a dummy "compound disorder" variable is then required, as in [12]. Details are omitted for brevity.

Incorporating observations. In each particular diagnostic case, the severities of some of the manifestations (m_j) will be assumed available, as measurements σ_j . With a "reliable" sensor, $m_j = \sigma_j$ is added to the restrictions. Unreliable ones may be modelled as an interval measurement $\sigma_j^{\min} \leq m_j \leq \sigma_j^{\max}$ or as (6) below.

A. Consistency-based diagnosis.

Given the σ_j and the constraints (1)–(3), the diagnosis problem may be formulated as a *constraint satisfaction problem*.

Each feasible solution (disorders d_i , association variables s_i^j , manifestations m_j) may be considered as an *explanation* of *all* the possible observations (usually, only faults are of interest). If no feasible solution exists, the diagnosis will be said to conclude an *unknown disorder*.

As all presented restrictions are linear in the unknown variables, *linear programming* (LP) may be used as a solution tool, at least in principle. Elementary LP theory shows that the set of feasible decision variables will be a convex polytope.

B. Abduction by optimization

Enumerating polytope vertices is overly impractical. The problem must then be converted to a LP optimization one in order to get a unique solution, as discussed below.

First, use as measurement equations:

$$m_i = \sigma_i + \epsilon_i - \nu_i, \quad \epsilon_i \geq 0, \nu_i \geq 0 \quad (6)$$

where ϵ_i and ν_i are dummy artificial variables. Then, any diagnostic is feasible.

Build a cost index, J , to be minimised. The index consists on two terms:

- A weighted sum of the disorders, $J_1 = \sum \alpha_i d_i$, where each α_i is inversely proportional to the *a priori possibility* of each disorder (expert-supplied). In this way, the most likely disorder consistent with the data will be output.
- A weighted sum of the dummy variables ϵ_i , ν_i whose weight is proportional to the reliability (or precision) of the measurement: heavily weighted variables would amount for the optimiser to try to find a solution with $m_i \approx \sigma_i$. If the weights on ϵ_i and ν_i were zero, that would indicate that manifestation m_i is unmeasured. An alternative possibility is minimising the discrepancy between predicted manifestations and observations, *i.e.*, minimising (via quadratic programming):

$$J = J_1 + \sum_i (\sigma_i - m_i)^2$$

The importance of the above ideas lies in the fact that it is very easy to integrate the treatment of inaccurate sensor readings (even totally wrong outliers), whereas they usually break havoc in logic-based approaches (unless all possible combinations of wrong sensor readings are considered in the rule base, which is usually too impractical) and that *tens of thousands* of rules and decision variables may be dealt with in a couple of minutes with current LP software on an ordinary PC, so the procedure is apt for large-scale cases.

In the optimization framework, the lower J is, the more “possible” is can be considered, rooting on the ideas in [13]. The following function (denoted as marginal possibility of disorder d_i):

$$\pi_i^{marg}(x) = e^{-\min_{d_i=z, \sigma_i \text{ given}} J_i(x)} \quad (7)$$

is usually very informative to the end user, as the application example will later discuss (see figures 2 and 3).

Remark: Uncertain associations (3) can be also stated as “softened” equalities:

$$s_i^j = d_i - \nu_i^j, \quad \nu_i^j \geq 0 \quad (8)$$

and ν_i^j may be added, suitably weighted, to the cost index. In this way, the weight would indicate how “possible” is the situation where d_i appears and m_j does not: a heavy weight on ν_i^j converts (8) in (1), a zero weight results in (3). This would refer to symptoms that “most of the times” appear but some times do not (the frequency of such situation dependent on the weight on ν). To model the converse situation (symptoms that only rarely appear), the equation to be added would be (3), directly weighing s_i^j in the cost index, hence penalising its deviations from zero. Details are omitted for brevity.

IV. CASE STUDY: OIL ANALYSIS DIAGNOSIS

This section presents a case-study of the previously described methodology applied to real measurements from different samples of oil from Diesel engines. A previous attempt was made with a binary-logic approach [14] and with an interval fuzzy logic-based expert system [15]. It was clear that the difficulties of scaling up, measurement outliers and mixing probability and fuzziness were out of reach for the above described platforms.

The test data and knowledge base focuses in automotive machine diagnosis (trucks, buses and road construction equipment). According to expert knowledge [14], the different parameters to be measured will be:

- *Oil properties:* age, viscosity, Total Base Number (TBN) and detergency.
- *Oil contamination:* insoluble compounds, fuel dilution, soot, powder ingestion (silicon), water and glycol.
- *Metallic elements:* iron, copper, lead, chromium, aluminum, tin, nickel, sodium and boron.

Such measurements give a reasonable view of the oil and engine state so that reliable enough diagnosis rules can be set up.

Some fuzzy sets were defined on the measured variables, to be later understood as the manifestations: **vh** (high viscosity), **vl** (low viscosity), **soot** (abnormal soot), **tbn** (abnormal TBN), **cu** (abnormal copper), **cuvh** (very high abnormal copper), *etc.* **nabo** refers to a fuzzy set defined on the quotient of sodium and boron concentrations.

The disorders to be isolated were: **wo** (wrong oil), **cp1** (combustion problems of type 1), **cp2** (combustion problems of type 2), **inj** (injection problems), **old** (old oil), **sc** (sample contamination with silicon), **dust** (dust ingestion in intake), **oilsil** (oil silicon contamination), **wat** (water leak to the oil), **wear** (wear).

From the expert knowledge [14], the Diesel engine seems to obey the cause-effect relationship in Figure 1: solid lines indicate certain relationships (1), dashed ones indicate uncertain manifestations (3), and the absence of any line

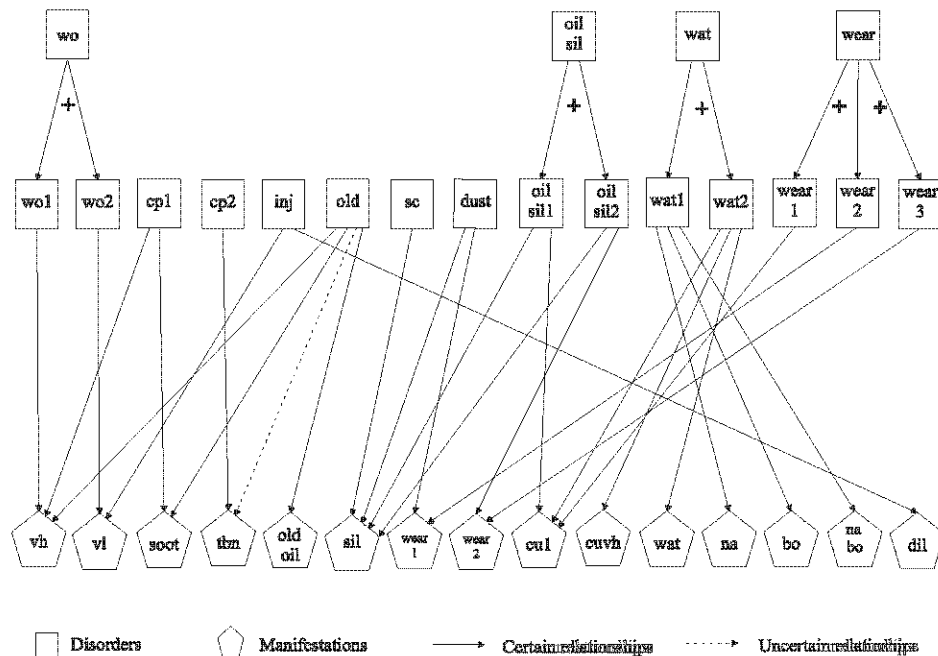


Fig. 1. Cause-effect diagram for the used oil analysis diagnosis system

indicates that the disorder does not produce the manifestation in consideration, *i.e.*, (2). In some cases, one disorder may produce different sets of manifestations, depending on the context (for instance, *wear*). In this case, each of the possible sets of symptoms is assigned a dummy disorder identifier (*wear1*, *wear2*, ...) and the disorder severity presented to the user is the maximum of those of the related dummy variables. The figure depicts, for instance, the rules:

- (1) *Old oil* produces *high viscosity*, *soot*, and *not young age* manifestation and, sometimes *abnormal TBN*.
- (2) *Wear* produces abnormal *copper* or abnormal *wear1* or abnormal *wear2*.

A. Optimization.

This work has used *Mathematica*[®] 5.2 to carry out the optimization, via its command “*Minimize*” which invokes the suitable LP routines and carries out symbolic processing of the constraints so they can be typed literally.

The command syntax is `Minimize[{index, constraints}, {decision variables}]`.

In our application, the constraints will be divided in several groups so the command is called with: `Minimize[{J, {RelationCoefficients, SuperpositionEq, DisorderAdds, PositivityConstraints, Manifestations}, {DecisionVariables}]`. *J* is the cost index or possibility that the disorders will be present. The lineal restrictions are contained in the variables, *RelationCoefficients*, *SuperpositionEq*, *DisorderAdds*, *PositivityConstraints*, and *Manifestations*.

RelationCoefficients: contains the associations:

$$\left\{ \begin{array}{lll} s_{wo1}^{vh} = d_{wo1}, & s_{wo2}^{vl} = d_{wo2}, & s_{cp1}^{vh} = d_{cp1}, \\ s_{cp1}^{soot} = d_{cp1}, & s_{cp2}^{tm} = d_{cp2}, & s_{inj}^{vl} = d_{inj}, \\ s_{dil}^{inj} = d_{inj}, & s_{old}^{vh} = d_{old}, & s_{old}^{soot} = d_{old}, \\ s_{old}^{tm} = d_{old1} - v, & & \dots \end{array} \right\}$$

Although the relationships are 27, we show only a few. The last one of the list, $s_{old}^{tm} = d_{old} - v$ corresponds to the uncertain relationship $s_{old}^{tm} \leq d_{old}$ if *v* is weighted by zero on the index (if its weight is non zero, it would indicate that “when d_{old} is present most of the cases TBN is abnormal but it is possible to be normal”; it has been left this way for illustration of the relationship between the inequality expression and the weighted artificial variable).

Observations., contains all the measurements of the manifestations or necessary symptoms for diagnosis.

$$Manifestations = \{m_{vh} = \sigma_{vh} + e1 - v1, m_{vl} = \sigma_{vl} + e2 - v2, \dots, m_{dil} = \sigma_{dil} + e15 - v15\}$$

All manifestations m_j are relaxed by the use of auxiliary variables e_i and v_i , as in (6). In this way, the system can handle outlier measurements, if any, and sensor uncertainty, by suitable weights in the cost index below.

Cost index J: this index includes all the disorders and the auxiliary variables. Each of the items in the index is weighted inversely proportional to its *a priori* possibility, according to expert assessment. In our case, the expert did not give any possibility ranking¹ so all the disorders were weighted with a

¹As previously discussed, possibilities allow an abductive choice when several disorders are consistent. However, the current setting of the oil diagnosis laboratory extracts quite a complete set of measurements, so that in all the tested samples there was only one global minimum of the index. However, the possibility of devising new analysis methodologies with less sample information is open and under study.

default value of 1, and the measurement errors were weighted with 5.

$$J = (0.0 * v + 5 * e_1 + 5 * v_1 + \dots + 5 * e_{15} + 5 * v_{15} + 1 * d_{wo} + \dots + 1 * d_{wear})$$

SuperpositionEq: the superposition equations should be included for each manifestation node m_j . Below are those for high viscosity, m_{vh} :

$$\text{SuperpositionEq} = \{s_{wo1}^{vh} = m_{vh}, s_{old}^{vh} = m_{vh}, s_{cp1}^{vh} = m_{vh}, s_{wo1}^{vh} + s_{old}^{vh} + s_{cp1}^{vh} \leq m_{vh}\}$$

DisorderAdds: this set of restrictions includes the compound disorders $\{wo \geq wo1, wo \geq wo2, oilsil \geq oilsil1, oilsil \geq oilsil2, wat \geq wat1, wat \geq wat2, wear \geq wear1, wear \geq wear2, wear \geq wear3\}$.

PositivityConstraints: involving that all variables in the optimization must be positive or zero.

Measurements: where actual values are given to σ_i on each sample.

V. DISORDERS RESULTS ANALYSIS

The used oil data were input to the systems via four text files. There was a pre-processing stage where fuzzy values for the observations σ were obtained from the numerical values of measurements and fuzzy set definitions stated by the expert for each abnormal manifestation.

Four measurement cases were studied. The fuzzy measurements σ_j are shown in table I below. The meaning of column **meas1b** will be later discussed.

TABLE I
MEASUREMENTS σ_j

m_j	meas1	meas2	meas3	meas4	meas1b
vh	0	0	1	0.05	0.03
vl	0.12	0.95	0	0	0.12
soot	0.03	0.03	0.95	0.02	0.03
tbn	0.13	0.14	0.19	0.09	0.13
age	0.333	0	1.0	0	0.06
sil	0	0.03	0.05	1	0
m_wear1	0.08	0	0.81	1	0.08
m_wear2	0.07	0	0.4	0.475	0.07
cu1	0	0	1	0.4	0
cuvh	0	0	0.04	0	0
wat	0.08	0.08	0.08	0.08	0.0
na	0.01	0.01	0.02	1	0.0
bo	0	0	0.835	1	0
nabo	0	0	0	1	0
dil	0.1	0.95	0.1	0.1	0.1

Table II below presents the results (optimal diagnosis) when each of the cases was input to the optimizer. Let us analyse in some detail the interpretation of them.

Case measures1: This, basically, detects irrelevant misfits in combustion, injection and wear, but nothing significant. The age reading of oil (see table I) seems slightly not correct (from TBN, soot and viscosity, the oil seems “younger” than the actual 0.333 “old”): anyway, the observed data do not seem to be originated from an old oil (or, even if old, the

TABLE II
DISORDERS RESULTS

disorder	meas1	meas2	meas3	meas4
wo	0.02	0	0	0.03
cp1	0	0.01	0.05	0.02
cp2	0.1	0.14	0	0.09
inj	0.1	0.95	0	0
old	0.03	0	0.95	0
dsc	0	0.03	0	0
dust	0	0	0.0	0.68
oilsil	0	0	0.025	0.16
wat	0	0	0.04	1
wear	0.08	0	0.94	0.32
COST	2.44	1.72	7.13	3.20
Possib	0.087	0.18	0.0008	0.041

conditions in which the engine was operating were mild so the oil degradation is lower than expected). As a conclusion, the “*measures1*” sample tells us that the machine that uses that oil is in good condition, and no disorder fires to a relevant strength.

The optimum cost corresponded to a value of the decision variables associated to measurement errors given by (only non-zero ones are shown)

$$e_1 = 0.03, v_5 = 0.273, v_{11} = 0.08, v_{12} = 0.01$$

which correspond, respectively to viscosity high measurement, age, water and sodium. This means that the “perfectly consistent” measurements should have read as indicated in column **meas1b** of Table I. The most “inconsistent” observation is the oil age, as previously commented, which must somehow be considered an outlier and brought to expert attention (which considered the deviation irrelevant and the diagnostic correct).

Case measures2, denotes is injection problems (0.95) plus incipient combustion ones (of type 2, fired by the slightly deviated TBN). Paradoxically it is deemed more possible than the case 1 (where situation was “normal”) because of the previously discussed slight discrepancy in the age reading (sensor errors are heavily weighted).

Case measures3, detects characteristic features of old, exhausted oil plus a very significant wear. Boron is, however, out of the predicted values, but no diagnostic rule appears to be set to capture such behavior... the system considers it as an “outlier measurement” (the value of J is much higher than in the rest of cases) but does not change its overall diagnosis: old oil and wear in the engine (possibly due of not having changed oil in time). If the outlier measurement is removed, the resulting diagnostic is the same, and the cost index is $J = 3.05$, which denotes a much more possible situation².

Case measures4, this readings indicate that the observed manifestations are compatible with “dust ingestion” plus “water contamination 1” (abnormal sodium and boron) plus

²Outlier handling should be, usually, carried out under the supervision of an expert. The important advantage of this approach is that it allows such handling whereas logic-based approaches usually fail “catastrophically” with outliers (the AND of 45 active symptoms and 1 inactive is zero: if the latter one is an outlier, it spoils the diagnostic).

(mild) “oil silicon contamination”, plus mild “wear”. The possibility of the result was somehow low, hence brought to expert attention. Basically, the expert concluded that the diagnostic was correct but dug into the details of the database. This sample was obtained from an engine operating at a potassium mine, so it was exposed to high amounts of suspended dust on air with abnormal compositions. The harsh operating conditions of the machine indeed caused increased wear and high presence of abnormal chemicals in the oil, so the machine required more frequent maintenance.

Summary. The conclusions of the optimization were well received by the expert who provided the rules. The expert (who was an engineer more familiar with optimization than with, say, uncertain logics), found the knowledge encoding methodology easier than the rule-based systems in [14], [15]. However, the tool was only deemed apt as a decision-aid one because: (1) the rules detected “outliers” now and then requiring expert attention and, (2) the expert had additional information about the working conditions of the engines (potassium mine, etc.) which helped him provide a clearer picture of the situation. The information provided with this system may lead to a modification of the possibilistic information to the rules (outliers seem “too” frequent, which mean that some of the manifestations are more “uncertain” than originally thought).

Marginal possibility plots. The plot of the cost index exponential, when giving some prefixed values of a decision variable (different to the optimal one) informs the user about the possibility of other alternative diagnosis.

For instance, Figure 2 depicts the marginal plot of d_{inj} with the measure set number 2, and Figure 3 does the same with disorder d_{sc} in measure set 4. They have been normalized to maximum height of one.

For instance, in Figure 2, basically the only reasonable diagnosis according to the data seems that there are injection problems, with severity 0.95 as consigned in Table II. However, in Figure 3 even if the “optimal” diagnosis is $d_{sc} = 0$ (the most possible severity in the figure is the value consigned in Table II), the possibility of $d_{sc} = 1$ remains high (0.44): there is uncertainty in the produced diagnosis.

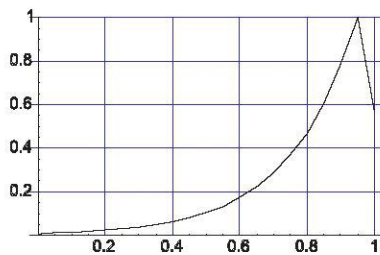


Fig. 2. Marginal possibility in *measures2* case for disorder d_{inj} . Abscissae: severity; Ordinate: possibility (normalized)

VI. CONCLUSIONS

This paper applied in a real-life example an optimization-based diagnostic approach which transforming fuzzy diagnostic problems into optimization ones. The application used

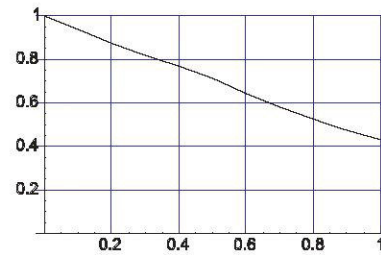


Fig. 3. Marginal possibility in *measures4* case for disorder d_{sc} . Abscissae: severity; Ordinate: possibility (normalized)

rules from mechanical engineers applied to experimental data from four different Diesel engines. The results seemed satisfactory and sensible when evaluated by the expert who provided the rules. Information about the quality of the diagnosis (presence of outliers, uncertainty in the results) is also automatically provided by the optimization software.

Research is ongoing on the generation of a suitable user interface (instead of hard-coding *Mathematica*[®] expressions), in order to ease rule edition. In this way, the possibilities of the technique in larger-scale cases and the specific benefits from the perspective of automation would be better assessed.

REFERENCES



- [1] L.H. Chiang, E.L. Russell, and R.D. Braatz. *Fault Detection and Diagnosis in Industrial Systems*. Springer-Verlag, 2001.
- [2] M. Blanke, M. Kinnaert, J. Lunze, and M. Staroswiecki, editors. *Diagnosis and Fault-Tolerant Control*. Springer, London, 2003.
- [3] E.F. Carrasco and J. Rodríguez *et. al.* Diagnosis of acidification states in an anaerobic wastewater treatment plant using a fuzzy-based expert system. *Control Engineering Practice*, 12(1):59–64, 2004.
- [4] R. Kruse, E. Schwecke, and J. Heinsohn, editors. *Uncertainty and vagueness in Knowledge Based Systems: Numerical Methods (Artificial Intelligence)*. Springer-Verlag, 1991.
- [5] O. Mouzon, D. Dubois, and H. Prade. Using consistency and abduction based indices in possibilistic causal diagnosis. In *Proc. IEEE Int. Fuzzy Systems Conf.*, pages 729–734, 2000.
- [6] D. Dubois, M. Grabisch, O. De Mouzon, and H. Prade. A possibilistic framework for single-fault causal diagnosis under uncertainty. *Int. J. General Systems*, 30(2):167–192, 2001.
- [7] S. Russell and P. Norvig. *Artificial Intelligence: a modern approach*. Prentice-Hall, 2nd edition, 2003.
- [8] A. Sala and P. Albertos. Fuzzy systems evaluation: The inference error approach. *IEEE Trans. on Syst. Man & Cybernetics*, 28B(2):268–275, 1998.
- [9] A. Sala. Fuzzy-logic diagnostic rules: a constrained optimisation viewpoint. In *Submitted to European Control Conference*, page Under review, 2007.
- [10] Y. Peng and J.A. Reggia. *Abductive inference models for diagnostic problem-solving*. Springer, 1990.
- [11] D. Dubois and H. Prade. Fuzzy relation equations and causal reasoning. *Fuzzy Sets and Systems*, 45(2):119–134, 1995.
- [12] O. Mouzon, D. Dubois, and H. Prade. Twofold fuzzy sets in single and multiple fault diagnosis, using information about normal values. In *Proc. IEEE Int. Fuzzy Systems Conf.*, pages 1563–1566, 2001.
- [13] D. Dubois, H. Fargier, and H. Prade. Possibility theory in constraint satisfaction problems: handling priority, preference and uncertainty. *Applied Intelligence*, 6(4):287–309, 1996.
- [14] V. Macián, B. Tormos, and M^o.J. Lerna. Knowledge based systems for predictive maintenance of diesel engines. In *Proc. Euromaintenance Conf.*, volume 1, pages 49–54. Swedish Maintenance Society-ENFMS, 2000.
- [15] A. Sala, B. Tormos, V. Macián, and E. Royo. Fuzzy diagnosis module based on interval fuzzy logic: oil analysis application. In *Proceedings of the 2nd International Conference on Informatics in control, automation and robotics (ICINCO)*. INSTICC Press, 2005.

ASTM D5185 - 18

Método de prueba estándar para determinación multielemental de aceites lubricantes y aceites base usados y sin usar mediante espectrometría de emisión atómica de plasma acoplado inductivamente (ICP-AES)

Active Standard ASTM D5185 Developed by Subcommittee: [D02.03](#)

Book of Standards Volume: 05.02

	Format	Pages	Price	
	PDF	14	\$50.00	 ADD TO CART

[Historical Version\(s\)](#) - view previous versions of standard

Translated Standard(s):  [English](#)

[ASTM License Agreement](#)

MORE D02.03 STANDARDS

RELATED PRODUCTS

Significance and Use

5.1 Este método de prueba abarca la determinación rápida de 22 elementos en aceites lubricantes y aceites base usados y sin usar, y proporciona una rápida detección de aceites usados para obtener indicaciones de desgaste. Los tiempos de prueba se aproximan a algunos minutos por espécimen de prueba, y la detectabilidad de la mayoría de los elementos se encuentra en el rango bajo de mg/kg. Además, este

método de prueba abarca una amplia variedad de metales en aceites base vírgenes y doblemente refinados. Pueden determinarse veintidós elementos, con tiempos de prueba que se aproximan a varios minutos por cada espécimen de prueba.

5.2 Cuando la fuente predominante de elementos aditivos en aceites lubricantes usados es el paquete de aditivos, la detección de diferencias significativas entre las concentraciones de elementos aditivos y sus respectivas especificaciones puede indicar que se está utilizando el aceite incorrecto. Las concentraciones de metales de desgaste pueden ser indicativas de desgaste anormal si hay datos de concentración de referencia para comparación. Un aumento marcado en los niveles de boro, sodio o potasio puede ser indicativo de contaminación como resultado de fugas de refrigerante en los equipos. Este método de prueba puede utilizarse para monitorear la condición de los equipos y definir acciones correctivas cuando sean necesarias.

5.2.1 La importancia del análisis de metales en aceites lubricantes usados se tabula en la Tabla 4.

Las concentraciones de metales en los aceites base doblemente refinados pueden ser indicativas de la eficiencia del proceso de doble refinación. Este método de prueba puede utilizarse para determinar si el aceite base cumple las especificaciones con respecto al contenido de metales.

1. Alcance

1.1 Este método de prueba abarca la determinación de elementos aditivos, metales de desgaste y contaminantes en aceites lubricantes y aceites base usados y sin usar utilizando espectrometría de emisión atómica de plasma acoplado inductivamente (inductively coupled plasma atomic emission spectrometry, ICP-AES). Los elementos específicos se enumeran en la Tabla 1.

1.2 Este método de prueba abarca la determinación de los elementos seleccionados, enumerados en la Tabla 1, en aceites doblemente refinados y aceites base vírgenes.

1.3 Para el análisis de cualquier elemento con longitudes de onda inferiores a 190 nm, se requiere un trayecto óptico en vacío o gas inerte. La determinación de sodio y potasio no es posible en algunos instrumentos que tienen un rango espectral limitado.

1.4 Este método de prueba utiliza metales solubles en aceite para la calibración y no pretende determinar cuantitativamente partículas insolubles. Los resultados analíticos dependen del tamaño de las partículas, y se obtienen resultados pobres en partículas mayores a algunos micrómetros

1.5 Los elementos presentes en concentraciones por encima del límite superior de las curvas de calibración pueden determinarse con diluciones apropiadas adicionales y sin degradación de la precisión.

1.6 Para otros elementos que no sean calcio, azufre y zinc, los límites bajos indicados en la Tabla 2 y en la Tabla 3 se estimaron en diez veces la desviación estándar de la repetibilidad. Para calcio, azufre y zinc, los límites bajos representan las concentraciones más bajas probadas en el estudio entre laboratorios.

1.7 Los valores indicados en unidades del Sistema Internacional (SI) deben considerarse como el estándar. No se incluyen otras unidades de medida en este estándar.

1.8 Este estándar no pretende abordar todas las inquietudes de seguridad, en caso de existir alguna, relacionadas con su uso. Es responsabilidad del usuario de este estándar establecer las prácticas de salud, seguridad y ambientales apropiadas y determinar la aplicabilidad de las limitaciones normativas antes de su uso. Se proporcionan enunciados específicos de advertencia en 6.1, 8.2 y 8.4.

1.9 Este estándar internacional fue desarrollado de conformidad con principios de estandarización reconocidos a nivel internacional y establecidos en la Decisión sobre Principios para el Desarrollo de Estándares, Guías y Recomendaciones Internacionales (Decision on Principles for the Development of International Standards, Guides and Recommendations) publicada por el Comité de Acuerdo sobre Obstáculos Técnicos al Comercio (Technical Barriers to Trade, TBT) de la Organización Mundial del Comercio.

2. Documentos Citados

C1109 Practice for Analysis of Aqueous Leachates from Nuclear Waste Materials Using Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectroscopy

D1552 Test Method for Sulfur in Petroleum Products by High Temperature Combustion and Infrared (IR) Detection or Thermal Conductivity Detection (TCD)

D4057 Practice for Manual Sampling of Petroleum and Petroleum Products

D4177 Practice for Automatic Sampling of Petroleum and Petroleum Products

D4307 Practice for Preparation of Liquid Blends for Use as Analytical Standards

D4628 Test Method for Analysis of Barium, Calcium, Magnesium, and Zinc in Unused Lubricating Oils by Atomic Absorption Spectrometry



Lubricating oil analysis according to ASTM D5185 using the Thermo Scientific iCAP 7400 ICP-OES

Authors

Nora Bartsch,
Application Specialist,
Thermo Fisher Scientific,
Bremen, Germany

Keywords

Additives, Contaminants,
Used oil, Wear metals

Goal

This application note describes the analysis of oils in accordance with standard test method ASTM D5185 for “Determination of Additive Elements, Wear Metals, and Contaminants in Used Lubricating Oils and Determination of Selected Elements in Base Oils by ICP-OES”. The Thermo Scientific iCAP 7400 ICP-OES Radial used for the analysis combines high matrix tolerance and reduced matrix-based interferences with a simple and efficient sample introduction design for optimized analyses.

Introduction

Analysis of used lubricating oil for wear metals, contaminants and additive elements is a valuable diagnostic tool to schedule preventative maintenance of engines and machinery. The cost of unscheduled maintenance can be high, not only in materials and labor, but also in lost profits due to down time. Once the oil has been sampled, analysis by ICP-OES is very useful for aiding with maintenance scheduling, basing decisions on the results of analysis. ICP-OES is an ideal technique due to its high temperature source which dissociates any organometallic compounds such as zinc dialkyldithio-phosphates, an additive used as anti-wear in motor oil, and also has the ability to handle difficult organic solvent matrices. This allows the oil to be directly aspirated into the instrument after a simple dilution, negating the need for any time consuming digestion sample preparations and consequently enabling faster turnaround times.

Standard method ASTM D5185

Scope

The standard method ASTM D5185 is for "Determination of Additive Elements, Wear Metals, and Contaminants in Used Lubricating Oils and Determination of Selected Elements in Base Oils by ICP-OES". A total of 22 elements can be determined by this test method and it is generally used as a rapid screening method to monitor the condition of the equipment using the oil and to define when preventative action is needed. The metallic analytes must be oil soluble for accurate quantification. The quantification of insoluble particles such as small particles (greater than a few micrometers) of metal dislodged from a mechanical part is not possible when using this method and any attempt to do so will result in low recoveries. This is due to the plasma not fully atomizing larger particles. It should also be highlighted that obtaining a representative sample would be difficult in such cases.

Summary of test method

An aliquot of a homogenized sample is diluted by weight with a suitable solvent (mixed xylenes). Standards are prepared in the same manner. The concentration of metals within a sample is then determined by direct analysis using ICP-OES.

Instrumentation

The Thermo Scientific™ iCAP™ 7400 ICP-OES Radial was chosen for the analysis. The radial instrument configuration was selected for its high matrix tolerance and reduced matrix interferences. The iCAP 7400 ICP-OES is fully compatible with the Teledyne CETAC ASX-1400 Stirring autosampler which ensures good homogeneity of the solutions analyzed.

Method development

Reagents

The following reagents and standards were used in this work: Xylene (Fisher Scientific, Loughborough, UK); Conostan® base oil (Conostan® SCP SCIENCE, Baie-D'Urfé, Canada); S21 Conostan oil-based standard 900 mg·kg⁻¹ (Ag, Al, B, Ba, Ca, Cd, Cr, Cu, Fe, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, P, Pb, Si, Sn, Ti, V, Zn); Conostan oil-based standard 5000 mg·kg⁻¹ S; Conostan oil-based standard 5000 mg·kg⁻¹ Y.

The following standard reference materials (SRM) and samples were analyzed: wear metals in lubricating oil NIST SRM 1084a (approximate concentrations 100 mg·kg⁻¹); wear metals in lubricating oil NIST SRM 1085b (approximate concentrations 300 mg·kg⁻¹); Quartz 7000 oil (Total); Quartz 7000 oil (Total) 200 hours use; Quartz 7000 oil (Total) 400 hours use.

Sample and standard preparation

Prior to any sample or stock standard being diluted, it was homogenized by sonication. For very viscous oils, the sample can be pre-heated to 60 °C.

The yttrium oil-based standard was diluted (by weight) in xylene to give a final concentration of 10 mg·kg⁻¹. This solution was used for all dilutions, the yttrium being used as an internal standard. For all samples and standards, the final solution contained 10% oil (by weight) to ensure that differences in viscosity were minimized. To achieve this, base oil was added if required to the standards prior to dilution with the solvent.

A blank was obtained by diluting the base oil in the dilution solvent ten-fold. The standards were prepared by diluting the stock standard by weight with the dilution solvent to give the required concentration. Separate standards for sulfur were prepared as the Conostan S21 standard contains metal sulfonates, hence sulfur. A check standard was prepared from a second source (NIST 1084a) in the same manner as the standards. All samples were diluted ten-fold by weight with the diluent solution.

Instrument parameters

The peristaltic pump was fitted with Solvent Flex pump tubing to introduce the sample and remove waste from the spray chamber. A V-groove nebulizer was used in conjunction with a baffled spray chamber. This combination was selected because it reduces the overall amount of solvent reaching the plasma and shows good efficiency at removing large particles from the sample aerosol. It is the standard organic sample introduction system used in the iCAP 7000 Plus Series ICP-OES. The plasma was then ignited and the appropriate parameters set (see Table 1). Xylene was aspirated for a period of 20 minutes prior to analysis. The method ASTM D5185 calls for wavelength profiling to be carried out prior to analysis. Due to the stability and intelligent design of the iCAP 7400 ICP-OES, this is not needed.

Table 1. Instrument parameters.

Parameter	Setting
Pump Tubing (Standard Pump)	Sample Solvent Flex orange/white Drain Solvent Flex white/white
Spray Chamber	Baffled cyclonic
Nebulizer	V-groove
Center Tube	1.0 mm
Pump Speed	40 rpm
Nebulizer Gas Flow	0.35 L·min ⁻¹
Auxiliary Gas Flow	1.5 L·min ⁻¹
Coolant Gas Flow	12 L·min ⁻¹
RF Power	1150 W
Radial Viewing Height	12 mm

Using the intuitive wavelength selection tool of the Thermo Scientific™ Qtegra™ Intelligent Scientific Data Solution™ (ISDS) Software, wavelengths were selected that were most likely to be free from interferences in this matrix. ASTM D5185 also gives a non-exhaustive list of suggested wavelengths that can be used as a guideline. Once each of the samples and standards were analyzed the sub-array plots were examined and changes were made to correct for interferences, as necessary. From the results obtained it was found that no mathematical correction factors such as Inter-Element Correction (IEC) were required.

Analysis

The instrument was calibrated and a check standard was run (NIST 1084a). The measured value of the check is required to be within 5% of the certified value for the analysis to continue, both after the initial calibration and at regular intervals every fifth sample. The following sequence was then analyzed 8 times:

Blank
 NIST 1085b
 Quartz 7000 oil (Total)
 Quartz 7000 oil (Total) 200 hours use
 Quartz 7000 oil (Total) 400 hours use
 Check standard NIST 1084a

Results

The results of the sample analysis can be seen in Table 2. Although the iCAP 7400 ICP-OES Radial is capable of detecting low concentrations, as demonstrated by the results of elements such as aluminium, ASTM D5185 expects detectability in the low mg·kg⁻¹ range for most elements to be sufficient. Focus is on trend analysis and identification of high concentrations of wear metals and additives in the oil/engine under study. The recovery of the check standard was better than 5% for the 9 analyses performed. The certified standard NIST SRM 1085b was also analyzed and results were within 5% of the expected values. As described in the standard method, certified standards should be regularly analyzed to verify accuracy and precision of the instrument calibration.

Table 2. Average results of the sample analysis in mg·kg⁻¹.

Element and wavelength	New oil	Intermediate oil	Old oil
Ag 338.389 nm	0.76	0.87	0.94
Al 308.215 nm	0.09	0.05	0.05
B 208.959 nm	2.14	1.63	2.46
Ba 223.527 nm	ND	0.46	0.82
Ca 184.006 nm	1103	2293	3014
Cd 214.438 nm	0.15	0.17	0.27
Cr 267.716 nm	0.12	1.15	2.54
Cu 324.754 nm	0.58	2.03	3.49
Fe 238.204 nm	2.76	23.2	30.8
Mg 279.553 nm	870.8	631.2	323.4
Mn 293.930 nm	0.21	0.63	0.89
Mo 281.615 nm	ND	0.16	0.38
Na 589.592 nm	5.71	5.2	3.71
Ni 231.604 nm	0.73	0.59	0.48
P 178.284 nm	972.4	1045	984.1
Pb 220.353 nm	16	12.1	8
S 180.731 nm	5731	5776	5134
Si 212.412 nm	7.15	10.3	10.8
Sn 283.999 nm	7.7	4.58	2.53
Ti 334.941 nm	0.4	0.48	0.51
V 309.311 nm	2.2	1.46	0.7
Zn 213.856 nm	1038	1143	1106

Figure 1 shows that as the oil is used in an engine, the elemental composition changes. In this case, the concentration of iron has increased which indicates possible wear of a number of components such as piston rings, ball/roller bearings or gears. The concentration of magnesium decreased with increased usage, possibly indicating that the additive components were consumed or lost from the solution, and the concentration of silicon remained constant which would indicate that the air filter is still intact and preventing dust entering the engine.

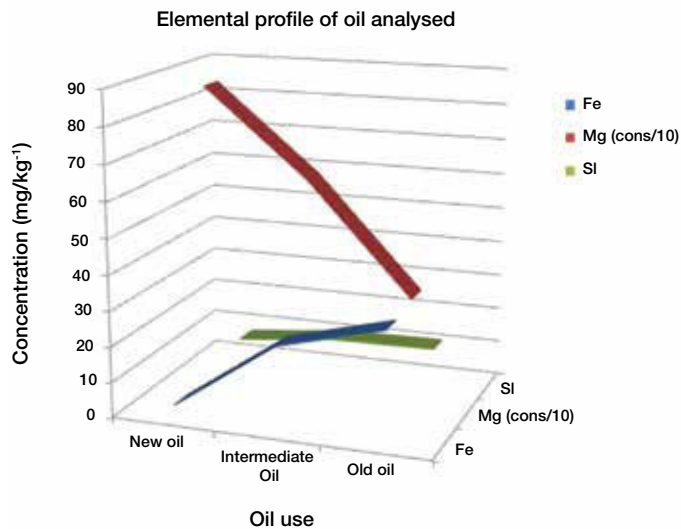


Figure 1. Changing elemental composition of an aging oil.

Conclusion

The Thermo Scientific iCAP 7400 ICP-OES Radial is capable of meeting the requirements of the standard method ASTM D5185 which details direct analysis of lubricating oils for wear metals and additives. The high matrix tolerance of this system is ideal for such challenging analysis whilst the speed of the instrument means the iCAP 7400 ICP-OES Radial is capable of high throughput analysis. Typical analysis times of less than two minutes are achieved, which is often a requirement for analyzing used oil samples in laboratories facing both a high volume of samples and the constraint for fast turnaround analysis times. Time is undeniably a key factor in preventative maintenance and reducing down time costs.

Find out more at thermofisher.com/ICP-OES

For Research Use Only. Not for use in diagnostic procedures. ©2017 Thermo Fisher Scientific Inc. All rights reserved. CONOSTAN®: A Division of SCP SCIENCE. Teledyne and CETAC are trademarks of Teledyne CETAC Technologies. All other trademarks are the property of Thermo Fisher Scientific and its subsidiaries. This information is presented as an example of the capabilities of Thermo Fisher Scientific products. It is not intended to encourage use of these products in any manner that might infringe the intellectual property rights of others. Specifications, terms and pricing are subject to change. Not all products are available in all countries. Please consult your local sales representative for details. **AN43158-EN 0617**

ThermoFisher
SCIENTIFIC

Chapter 3

Friction, Wear and the Role of Additives in Controlling Them

C.H. Bovington

All things and everything whatsoever, however thin it be, which is interposed in the middle between objects that rub together, lighten the difficulty of this friction

Leonardo Da Vinci 1452–1511 [1]

Abstract The laws of friction are described. Abrasive, adhesive, contact fatigue and corrosive wear mechanisms are explained. The tribological regime of boundary lubrication is discussed in the context of the Stribeck curve and surface film formation. Physical processes for surface film formation and their properties are examined for oxygen-, nitrogen-, sulphur-, phosphorus, boron, molybdenum-containing organic compounds and ZDDP in particular. ZDDP film formation is discussed in depth and the influence of dispersants described. Interactions between reduced ZDDP levels and molybdenum compounds to maintain wear protection and antioxidantancy are considered for the requirements of lower SAPS formulations in future formulations.

3.1 Introduction to the Mechanisms of Friction

Friction is the resistance to motion of one body in contact with another and is proportional to the applied load but independent of the sliding surface area. These laws are attributable to Leonardo Da Vinci [1], then rediscovered by Amontons in 1699 [2]. In 1781 Coulomb distinguished between static friction, the force required to start sliding, and kinetic friction, the force required to maintain motion [3]. He showed that kinetic friction is lower than static friction and is nearly always independent of the speed of sliding. To understand the causes of friction, the following must be considered:

- (i) Even the most carefully prepared surfaces contain peaks (called asperities) and valleys which are large compared with molecular dimensions. The solid surfaces contain peaks of these highest asperities, so the area of intimate contact reach between them is very small. The real area of contact is influenced

by the magnitude of the applied load since under the intense pressure of the localised points of contact, plastic deformation and flow occurs until the area is sufficiently great to support the load.

- (ii) When sliding takes place, all of the friction occur over the very small contact area and surface temperatures at the rubbing asperity contacts reach very high values. This heating effect may cause micro-structural changes to asperities as well as local melting.
- (iii) At the points of asperity contact, there are real adhesions and welding together of the two surfaces. The frictional force is mainly the force required to shear these junctions.

The classic laws of friction can now be understood since the contact area over which the junctions are formed is almost independent of the apparent, dimensional, area of the sliding surface and is directly proportional to the applied load. With static surfaces, or at low sliding speeds, cold welding is produced by the intense pressure in the region of contact. At higher speeds it is assisted by the high-temperature softening or melting of the metal surface.

The energy required to shear these asperity welds accounts, in part, for metal to metal friction; there is a further component contributing to the overall friction, 'ploughing'. This is the force F_p required to displace the softer metal of the two dissimilar metals in sliding contact. The total frictional force F_1 is given by Equation (3.1) as:

$$F_1 = F_A + F_p \quad (\text{Eqn. 3.1})$$

where F_A is the force needed to shear adhesive junctions, $= A_c S$, A_c is the real area of contact, taking account of the elasticity of the two surfaces, S is the effective shear stress of the junctions.

For most combinations of materials, F_p is the minor contribution so that μ , the coefficient of friction, is given by Equation (3.2) as:

$$\mu = F_1/W = F_A/W = S/H \quad (\text{Eqn. 3.2})$$

where H is the effective surface hardness, W is the applied load and S is the shear strength. From these simple theories, it follows that for low friction the sliding materials must have the following:

- low shear strength,
- high hardness.

These requirements are met if *thin* low-shear-strength layers are formed on hard metal substances. The low-shear-strength layer must be thin enough not to yield significantly and thus increase the real area of contact A_c . Later sections of this chapter examine how lubricant additives can provide a low-shear-strength film and can, in many cases, militate against the ploughing effect in those cases where ploughing is a significant contribution to overall friction.

3.2 Mechanisms of Wear

Wear is the process of physical loss of material. In sliding contacts this can arise from a number of processes; in order of relative importance they are adhesion, abrasion, corrosion and contact fatigue. Wear occurs because of local mechanical failure of highly stressed interfacial zones and the mode of failure is influenced by environmental factors.

3.2.1 Adhesive Wear

Bonding, or cold weld formation, can occur at the asperity tips of contacting, loaded, surfaces. This is the first stage of a wear mechanism and does not lead directly to any loss of material from the system. The bonded section may be work hardened, and hence strengthened, and shear may occur not at the asperity tip junctions but within the body of the material. This transfers material from one surface to the other and no overall wear occurs until a secondary process causes the transferred material to break away. Sometimes transferred material resides in a surface and may even transfer back to the original surface. However, groups of particles can be formed which break away as a single entity when the elastic energy just exceeds the surface energy, the latter being greatly reduced by environmental reaction.

Adhesive wear processes can be viewed as a state of dynamic equilibrium with their environment. The fresh surfaces exposed by wear are more reactive than the original surface and must be passivated by additives if wear is not to be catastrophic. Many wear processes commence as adhesive wear but the fact that this mechanism leads to the formation of abrasive debris inevitably means that there is a possible transition of the wear mechanism from adhesive to abrasive. Adhesion and adhesive wear can be limited by:

- using metal combinations which do not bond together easily,
- improving the formation of low-shear-strength additive layers,
- increasing the oil film thickness.

3.2.2 Abrasive Wear

Wear caused by the presence of hard particles in the contact is very similar to grinding or machining operations, although with less efficiency. During abrasion a metal undergoes extensive work hardening. For this reason the initial hardness of the abrasive particle is unimportant if the heat-transformed wear particle is substantially harder than that of the metal surfaces. Should the wear particle present in the contact become softer due to thermal processes generated by friction, then the particle will be deformed under the contact pressure and damage to the sliding surfaces is minimised. Examples of frictional hardening and softening are well documented and can be predicted from the phase diagrams of metals.

which often operate simultaneously, all of which counter one or both of the general causes of friction (and hence wear) previously described, i.e. the reduction of energy required to shear asperity junctions and a reduction in ploughing.

3.3.1 Mechanisms of Film Formation

These mechanisms include the following:

- (i) *Formation of a layer of molecules adsorbed by van der Waals forces:* To form such layers a molecule must have a polar end which attaches to the metal – attachment through more than one polar group is also possible – and a non-polar end which points out into the oil solution; Fig. 3.1 illustrates such film formation. These layers are a shear strength layer which allows motion without high friction and can also reduce wear. The temperature/load range over which they are effective depends upon their individual structure.

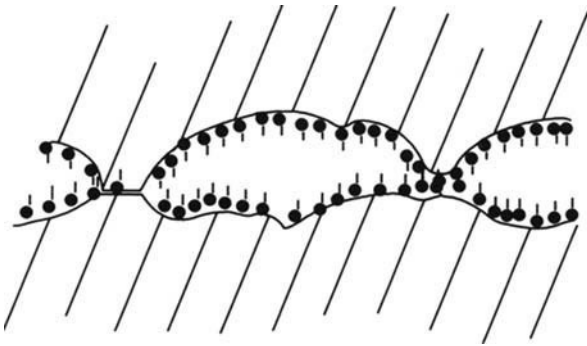


Fig. 3.1 van der Waals adsorption

- (ii) *Formation of high-viscosity layers:* Layers formed by the reaction of oil components in the presence of rubbed metal surfaces can produce relatively thick, $>10\ \mu\text{m}$, layers of high-viscosity material which can be globular or continuous, Fig. 3.2. This film gives a hydrodynamic effect even at low speeds and may be linked to the surface by van der Waals forces. These films tend to be less effective under high contact loads.
- (iii) *Thin reacted layer plus smoothing:* Oil components chemically attack exposed clean metal surfaces to give a thin, chemically altered layer, e.g. a soap, Fig. 3.3. Chemical film formation does not occur to any appreciable depth and abrasion plus this attack smoothes asperities. This fact, together with the low shear strength of the film, leads to reduction of adhesion and ploughing. Moderate temperatures are often required for the formation of these films.

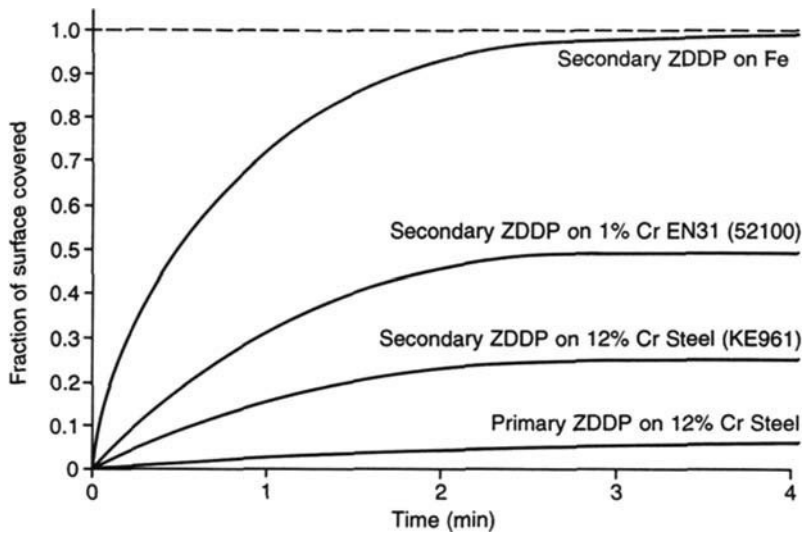


Fig. 3.7 ZDDP adsorption on ferrous surfaces: variations with steel metallurgy

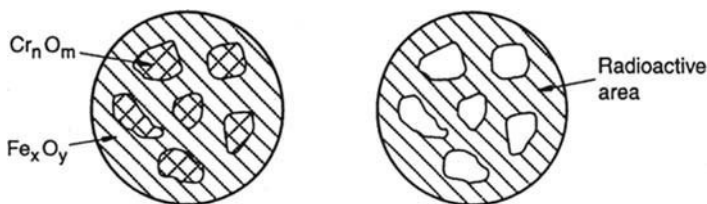


Fig. 3.8 Evidence for the inert nature of chromium oxides

Surfaces generated under rubbing conditions are more reactive towards additives than are static surfaces. In part this is due to the presence of oxide films on static surfaces which are removed by sliding contact and the fresh 'nascent' metal surface has a higher reactivity than its oxidised predecessor. In addition to the above, and of increasing interest, rubbing surfaces generate low energy, 1–3 eV, electrons or exoelectrons spontaneously [12], which can promote chemical reactions, i.e. polymerisation [13], and may be involved in the mechanism of ZDDP-reactive film formation [14].

3.4.4 Corrosive/Adhesive Balance

Wear control by reactive film formation involves a corrosive wear process to limit the rate of an adhesive wear process. The protective film is removed during the sliding process and must be replaced in time between successive contacts. If the rate

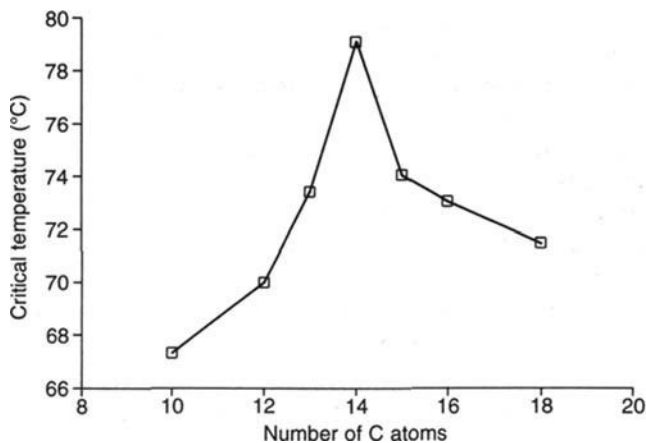


Fig. 3.11 The upper temperature limit of friction control for a homologous series of carboxylic acids in *n*-tetradecane

modification. For example, whilst nitroalkanes have greater dipole moments than carboxylic acids, 2.2 Debyes compared to 1.7 Debyes [15], they do not reduce friction under boundary conditions. The difference between the less polar groups of the known boundary lubricants and the nitro groups is that the former are capable of hydrogen bonding whereas the latter are not [16]. Hydrogen bonding is a special case of a donor-acceptor interaction with an electronegative atom, usually oxygen or nitrogen with an unshared electron pair, functioning as the acceptor and a hydrogen atom, covalently bonded to a second electronegative atom, functioning as the donor. Due to differences in electronegativity of the atoms comprising a hydrogen bonding functional group, as either donor or acceptor, hydrogen bonding groups must be polar, but the reverse is not necessarily true.

There has been debate for many years as to whether long-chain surfactant friction modifier additives reduce friction by forming adsorbed films of monolayer thickness or whether they form thick films equivalent to several, or many, multilayers [17]. An investigation compared a series of metal oleate friction modifier additives and their film-forming properties in rolling contact conditions using ultra-thin film interferometry. It was found that some of these additives form thick boundary films while others do not. It was concluded that thick boundary films result from the formation of insoluble iron(II) oleate on the rubbing surfaces and that for metal oleates this will occur only for metals lower than iron in the electrochemical series. This is due to a redox reaction involving iron from the steel surface and the metal oleate.

The behaviours of mono-, di- and triesters of glycerol oleate were compared as a range of commercial organic friction modifiers in a synthetic base fluid. Of the esters studied, the monoester gave the lowest friction and base fluid polarity had no discernable effect on boundary friction [18].

A recent study showed that under low-load conditions and with ultra-smooth surfaces, lyophilic friction modifiers can influence hydrodynamic friction by inducing

tions, has limited their usefulness in crankcase applications. Nevertheless, certain sulphur-containing compounds have been used as supplementary anti-wear agents in crankcase lubricants and have potential use in low or zero phosphorus application. Typical of these would be the sulphurised esters of fatty acids, the dimercapthiadiazoles or the dithiocarbamates.

Dimercapthiadiazoles are widely used as metal passivators and as load-carrying additives. They have been used particularly as potential replacements for ZDDPs in zero phosphorus formulations [24]. Structural features in the molecules can have considerable impact upon frictional and wear properties but appear to have little influence on rust inhibition and antioxidancy. In particular, the friction/wear properties may be modified by the side chains attached at the 2- and 5-carbon position of the thiadiazole ring. Particularly good friction and wear reduction occurs when a hydroxyl group is attached to the end of a straight alkyl chain. Side chains may contain phosphorus atoms and/or disulphide linkages, such as $-S-S-P(S)(OR)_2$, and $-S-S-R$. These phosphorus-containing derivatives exhibit extra effectiveness as friction modifiers and anti-wear agents. Surface films contain iron phosphate as well as FeS, polysulphide, $Fe_2(SO_4)_3$ and organonitrogen compounds found in the absence of phosphorus-containing substituents.

Dithiocarbamates of zinc, and particularly of molybdenum, show friction- and wear-reducing properties particularly when used in conjunction with ZDDPs and are discussed in the following sections.

3.5.3 Organophosphorus Esters

Organophosphorus esters have long been added to oils as anti-wear agents and mechanistic studies have identified two different types of reaction films:

- those derived from tricresyl phosphate, which form thin films, 0.1–2 nm, of low-shear-strength $FePO_4$ and $Fe PO_4 \cdot 2H_2O$ and
- those which give thick, approx. 100–300 nm, films of a polymeric nature. These mainly consist of iron (III) monoalkyl/aryl phosphate oligomers, Fig. 3.13, of a type formed by phosphonates of the structure $(RO)_2P(O)H$, where R = hexyl, octyl, dodecyl, phenyl or octylphenyl [25].

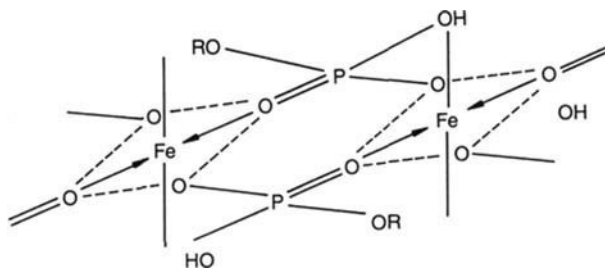


Fig. 3.13 The iron (III) monoalkyl/aryl phosphate oligomer

tions, has limited their usefulness in crankcase applications. Nevertheless, certain sulphur-containing compounds have been used as supplementary anti-wear agents in crankcase lubricants and have potential use in low or zero phosphorus application. Typical of these would be the sulphurised esters of fatty acids, the dimercapthiadiazoles or the dithiocarbamates.

Dimercapthiadiazoles are widely used as metal passivators and as load-carrying additives. They have been used particularly as potential replacements for ZDDPs in zero phosphorus formulations [24]. Structural features in the molecules can have considerable impact upon frictional and wear properties but appear to have little influence on rust inhibition and antioxidancy. In particular, the friction/wear properties may be modified by the side chains attached at the 2- and 5-carbon position of the thiadiazole ring. Particularly good friction and wear reduction occurs when a hydroxyl group is attached to the end of a straight alkyl chain. Side chains may contain phosphorus atoms and/or disulphide linkages, such as $-S-S-P(S)(OR)_2$, and $-S-S-R$. These phosphorus-containing derivatives exhibit extra effectiveness as friction modifiers and anti-wear agents. Surface films contain iron phosphate as well as FeS, polysulphide, $Fe_2(SO_4)_3$ and organonitrogen compounds found in the absence of phosphorus-containing substituents.

Dithiocarbamates of zinc, and particularly of molybdenum, show friction- and wear-reducing properties particularly when used in conjunction with ZDDPs and are discussed in the following sections.

3.5.3 Organophosphorus Esters

Organophosphorus esters have long been added to oils as anti-wear agents and mechanistic studies have identified two different types of reaction films:

- those derived from tricresyl phosphate, which form thin films, 0.1–2 nm, of low-shear-strength $FePO_4$ and $Fe PO_4 \cdot 2H_2O$ and
- those which give thick, approx. 100–300 nm, films of a polymeric nature. These mainly consist of iron (III) monoalkyl/aryl phosphate oligomers, Fig. 3.13, of a type formed by phosphonates of the structure $(RO)_2P(O)H$, where R = hexyl, octyl, dodecyl, phenyl or octylphenyl [25].

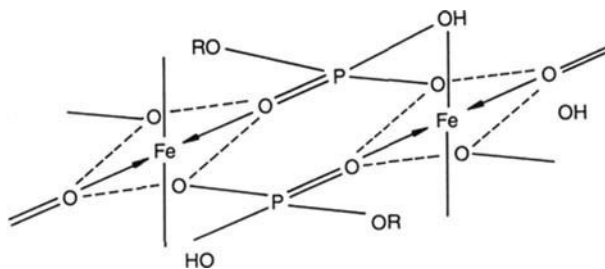


Fig. 3.13 The iron (III) monoalkyl/aryl phosphate oligomer

structure. In the case of ZDDP, the role of other additives on film formation and anti-wear behaviour has been discussed. Successful control of anti-wear and anti-friction properties of oils requires a careful balance of the additives in the formulation.

Problems of formulating low-sulphur and -phosphorus lubricants: The need for engine manufacturers to ensure the durability of exhaust after-treatment devices, and hence to maintain exhaust emission standards, has led to a demand for crankcase lubricants which contain reduced levels of sulphur and phosphorus. These elements are implicated in the reduction in efficiency of such after-treatment devices.

A major source of sulphur in most engine oils is the base stock into which the additive package is blended. These base oils are also used as diluents for highly viscous lubricant additives in order to facilitate handling and blending. For this reason it is likely that low-sulphur and -phosphorus formulations will be blended using expensive, non-polar, Group IV basestocks such as poly- α -olefins, together with, perhaps, some polar ester to improve the solubility of the additive package used. These basestocks have excellent low-temperature viscometric properties and allow the blending of oils with a wide viscosity range. These basestocks also have lower values of limiting traction coefficients than do iso-viscous, higher sulphur Groups I–III basestocks. This property is associated with improved fuel efficiency.

The downside is that these base oils have lower values of pressure viscosity coefficients and hence under both hydrodynamic and elastohydrodynamic lubrication conditions, the films formed in contacts will be thinner than that for an iso-viscous, higher sulphur basestock.

The principal problem, which is compounded by the above, is that the most cost-effective source of anti-wear film formation and the most effective peroxide decomposing agent has, since the 1940s, been ZDDPs which contain both sulphur and phosphorus as the active elements.

An enforced reduction in the concentration of ZDDPs and MoS compounds which can be included in additive packages for low SAPs applications means that consideration must be given to how to maintain wear protection and antioxidancy at an acceptable level. Normal phosphorus levels are of the order of 0.12% in the finished, formulated lubricant. If levels of 0.08% phosphorus are required, then this poses few problems since such formulations have already been well tried in certain markets. If levels of 0.05% phosphorus are stipulated, then formulating to meet wear targets becomes more difficult and interactions between ZDDPs and other additives present as well as surface competition between additives become critical.

References

1. Leonardo Da Vinci (1452–1511), Codex Madrid, I. see D. Dowson, 'History of Tribology, 2nd Edn.', pp. 595–597, Professional Engineering Publications, Bournemouth, UK, (1998).
2. Amontons, G. (1699), *De la resistance caus'ee dans les machines*. Memoires de l'Academie Royale **A**, 251–282, Chez Gerard Kuyper, Amsterdam, (1706).
3. Coulomb, C.A. (1781), *Theorie des machines simples, et ayant egard au frottement de leurs parties, et a la roideur des cordages*, Mem. Math. Phys. (Paris) **X** 161–432.

4. Dacre, B., Savory, B. and Wheeler, P. (1981), JCS Farad. Trans. **1**(77), 1285–1296.
5. Dacre, B. and Bovington, C. (1982), ASLE Trans. **25**(2), 272–278.
6. Bovington, C. and Dacre, B. (1984), ASLE Trans. **27**(3), 252–258.
7. Stipanovic, A. and Schoonmaker, J. (1993), SAE Paper 932779.
8. Willermet, P., Mahoney, L. and Bishop, C. (1980), ASLE Trans. **23**, 225–231.
9. Plaza, S. and Kajdas, C. (1994), Wear **196**, 1–8.
10. Bowden, F. and Tabor, D. (1986), *The Friction and Lubrication of Solids*, Clarendon Press, Oxford.
11. Dacre, B., Savory, B. and Wheeler, P. (1987), *Tribology, Friction Lubrication and Wear*, IMechEng, p. 573.
12. Rosenblum, B., Brantich, P. and Himmel, L. (1970), J. Appl. Phys. **48**, 5262.
13. Kajdas, C., Lafleche, P., Furey, M., Hellgeth, J. and Ward, T. (1992), Tribology 2000 Tech. Akad. Esslingen.
14. Monteil, G., Lonchamp, J. and Roques-Carnes, C. (1987), Intl. Conf on Tribology – Friction Lubrication and Wear Inst. Mech. Eng. p531–535.
15. Belzer, M. and Jahanmir, S. (1992), Lube. Sci. **1**, 3.
16. Gorby, W. (1939), J. Chem. Phys. **7**, 167.
17. Ratoi, M., Bovington, C. and Spikes, H. (2003), Trib. Lett. **14**, 33–40.
18. Castle, R. and Bovington, C. (2003), Lub. Sci. **15**, 253–263.
19. Choo J-H., Forest, A.K. and Spikes H.A. (2007), Trib. Lett. **27**, 239–244.
20. Stinton, H., Spikes, H. and Cameron A. (1982), ASLE Trans. **25**, 355.
21. Rabinowitz, E. (1977), Exoelectrons, Sci. Am. **236**, 74–81.
22. Okabe, H., Ohmori, T. and Masuko, M. (1985), Proc. JSLE Int. Trib. Conf. Tokyo, p. 691–696.
23. Hu, Z., Tao, D. and Wong, R. (1992), Proc. China Int. Symp. Young Trib. p. 368.
24. Wei, D-P., Cao, L. and Wang-L. (1995), Lub. Sci. **7**, 365–377.
25. Lacey, I., Kelsall, G., Spikes, H. and MacPherson, P. (1986), ASLE Trans. **29**, 229–305 and 306–311.
26. Bieher, P.A., Klaus, E.E. and Tewksbury, E.J. (1968), ASLE Trans. **11**, 155–161.
27. Johnson, G.J. (1990), PhD, Thesis, Univ. London.
28. Korcek, S., Jensen, R., Johnson, M. and Clausing, E. (1995), Proc. Int. Trib. Conf. Yokohama.
29. Kubo, K., Shitamichi, T. and Motoyama, K. (1995), Proc. Int. Trib. Conf. Yokohama.
30. Muraki, M. and Wada, H. (1994), Tribologist, **39**(9), 800.
31. Muraki, M., Yanagi, Y. and Sakaguchi, K. (1995), Proc. Inter. Trib. Conf., Yokohama.
32. Stipanovic, A., Schoonmaker J., Mowlem, J. and Smith, M. (1995), Proc. Inter. Trib. Conf., Yokohama.
33. Paliacios, J.M. (1987), Wear **114**, 41–49; Bell, J., Coy, R. and Spikes, H. (1990), Proc. Jap. Inst. Tribol. Conf. Nagoya, pp. 505–510; Shearsby, J. and Nisenhalz, R. (1993), STLE Trans. **36**, 399–404.
34. Suominen Fuller, M.L., Rodriguez-Fernandez, L., Massoumi, G.R., Lennard, W.N., Kasrai, M. and Bancroft, G.M. (2000), Trib. Lett. **8**, 187–192.
35. Fujita, H. and Spikes, H.A. (2004), Proc. Inst. Mech. Eng. Journal Part J. J. Eng. Tribol. **17**, 593–605.
36. Taylor, L., Dratva, A. and Spikes H.A. (2000), Trib. Trans. **43**, 469–479.
37. Yin, Z., Kasrai, M., Bancroft, G.M., Fyfe, K. and Tan, K.H. (1997), Wear **202**, 172–191.
38. Martin, J.M., Groissord, C., Le Monge, T., Bec, S. and Tonck, A. (2001), Tribol. Int. **34**, 523–530.
39. Alliston-Greiner, A., Greenwood, J. and Cameron, A. (1987), Proc. Leeds-Lyon Symp., p. 161.
40. Bec, S., Tonck, A., George, J.M., Coy, R.C., Bell, J. and Roper, G. (1999), Proc. Roy. Soc. Lond. **A455**, 4181–4203.
41. Taylor, L. and Spikes, H.A. (2003), Trib. Trans. **46**, 303–309.
42. Allum, K. and Forbes, E. (1969), Inst. Mech. Eng. Proc. **183**(pt 3), 9–16.
43. Rounds, F. (1975), ASLE Trans. **18**(2), 79–89.

44. Rowe, C. and Dickert, J. (1967), *ASLE Trans.* **10**, 85–90.
45. Fujitsa, K., Esaki, Y. and Kawamura, M. (1983), *Wear* **89**, 323–331.
46. Jones, R. and Coy, R. (1981), *ASLE Trans.* **24**, 1.
47. Powell, K. (1986), PhD, Thesis, RMCS Cranfield.
48. Gallopoulos, N. and Murphy, C. (1971), *ASLE Trans.* **14**, 1–7.
49. Inoue, K. and Watanabe, H. (1983), *ASLE Trans.* **26**(2), 189.
50. Kawamura, M., Fujita, K., Esaki, Y. and Moritani, H. (1985), *SAE Trans.* 496–502.
51. Harrison, P. and Kikabhai, T. (1987), *Wear* **116**, 25–31.
52. Harrison, P. and Kikabhai, T. (1987), *Chem. Soc/Dalton Trans.* 807.
53. Fujita, H., Glovnea, R.P. and Spikes, H.A. (2005), *Trib. Trans.* **48**, 558–566.
54. Kulp, M., Gundic, D., Hanna, M. and Fabian, L. (1992), *SAE Paper 922282*.
55. Howard, J. (1980), 'Frontiers of Free Radical Chemistry', W.A. Prior, (Ed.), Academic Press, NY, pp. 237–282.
56. Schumacher, R. (1992), *Tribol. Int.* **25**(4), 259–270.
57. Willermet, P. and Kandah, S. (1994), *ASLE Trans.* **27**, 67–72.
58. Paddy, J., Lee, N., Watters, D. and Trott, W. (1990), *ASLE Trans.* **33**(11), 15–20.
59. Emanuel, E., Maizus, J. and Skibida, I. (1969), *Angew. Chem.* **81**, 91.
60. Murakami, Y. and Aihara, H. (1991), *SAE Paper 910747*.
61. Bovington, C., Hubbard, A. and Johnston, G. (1992), *Proc. 8th. Int. Colloq. Esslingen, Tribology, 2000*, 11–13.
62. McGeehan, J. and Yamaguchi, E. (1989), *SAE Paper 892112*.
63. Murakami, Y., Hanada, K., Hirose, A. and Aihara, H. (1993), *4th Int. Symp. CEC, Paper EL13, Birmingham*.
64. Bregent, R., Bouvier, J. and LePetre, P. (1992), *AGELFI Conf.*
65. Chinas-Castillo, F. and Spikes, H. (2004), *Trib. Lett.* **16**, 317–322.

7.3 Evaluación de análisis

Una vez realizados todos los análisis, según el plan establecido en cada caso sobre la muestra de aceite; dichos resultados serán los parámetros de entrada al sistema automático de diagnóstico.

El primer paso a realizar sobre los mismos es su evaluación, de cara a determinar si el resultado obtenido en el análisis se encuentra dentro de un rango normal o si al contrario puede ser indicativo de la ocurrencia de algún tipo de problema.

Aunque en principio podría pensarse en la utilización de forma exclusiva de escalas de comparación absoluta, en las cuales los límites son fijados en base a la experiencia acumulada, se considera un planteamiento mejor utilizar escalas de tipo relativo o evaluación por tendencias en función del análisis concreto que estemos evaluando. Sobre todo, en la medida de las concentraciones metálicas, debido a los muchos factores que afectan al resultado del análisis y que pueden quedar fuera del control en escalas absolutas definidas por fabricantes, usuarios, mantenedores o laboratorios especializados, y de cara a tenerlos en cuenta a la hora de realizar un diagnóstico preciso. La evaluación por tendencias es la manera que puede aportar los máximos beneficios [Evans, J. S.; 2002] en este caso y en general en gran número de técnicas aplicables al mantenimiento predictivo.

Tras lo expuesto anteriormente, se van a considerar por tanto tres criterios diferentes en función de la magnitud a contrastar:

- Escalas fijadas sobre valores absolutos (aplicables a contaminantes)
- Escalas relativas, función de las variaciones producidas sobre los valores originales del aceite nuevo (aplicables a las propiedades del aceite).
- Escalas basadas en tendencias de comportamiento (parámetros de desgaste o contaminación)

Además, hay que tener en cuenta que el objetivo final de realizar un diagnóstico automático del estado del aceite y del motor mediante el análisis del aceite usado en el mismo, se va a ver facilitado si conseguimos que el resultado de la evaluación de los diferentes análisis realizados sea expresado o calificado en forma de un índice, de esta manera independientemente del análisis que estemos utilizando tendremos una escala de valoración del "nivel de bondad o de gravedad" de dicho análisis.

Tormos, Bernardo. Diagnóstico de motores diesel mediante el análisis del aceite usado.

España: Editorial Reverté, 2005.

ebrary collections. 28 May. 2014

Copyright © 2005. Editorial Reverté. All rights reserved.

May not be reproduced in any form without permission from the publisher, except fair uses permitted under U.S. or applicable copyright law.

7.3.1 Escalas absolutas

Para las magnitudes de parámetros de contaminación del aceite se establece su nivel de gravedad contrastando el valor obtenido en el análisis frente a valores fijos determinados, lo que denominamos límites. Los parámetros evaluados de esta forma serán: contenido en agua, dilución, materia carbonosa, insolubles y metales de contaminación (sodio). Adicionalmente utilizaremos este tipo de escala de evaluación para los parámetros de oxidación y nitración; aunque estos sean representativos del nivel de degradación del aceite, por su modo de medida, resulta más claro este tipo de escala.

En este caso se definirán dos límites, que a su vez definen tres rangos de estado: L_1 (límite de alerta) y L_2 (límite de alarma).

Se entiende perfectamente que en estos casos, la no presencia en el aceite de un contaminante determinado es indicativo de que no se ha producido dicha contaminación. A medida que comienza a haber presencia del mismo, definimos un límite de presencia del contaminante indicativo de que dicha presencia comienza a ser representativa en el aceite y potencialmente dañina para el propio aceite y el motor (límite de alerta). En caso de que la presencia continúe creciendo rebasará el límite definido como alarma, indicativo en este caso que dicha contaminación rebasa los límites aceptables para el correcto funcionamiento del sistema. Gráficamente se pueden representar tal como vemos en la figura 7.1.



Figura 7.1. Rangos de estado y límites que definen los mismos.

Tal como se ha comentado anteriormente, de cara a tener un parámetro definitorio del nivel de bondad o gravedad del análisis independientemente de la escala y los límites a los que se refiere, se puede realizar la siguiente conversión.

Se define como escala de valoración del nivel de gravedad, el llamado índice decimal, que varía entre 0 y 10 y que se ajusta de la siguiente manera: para el valor de L_1 (independientemente del análisis que se este contrastando) se le asigna siempre un valor de índice decimal de 2,0 y para el valor de L_2 el

valor de 4,0. Con ello, los valores resultantes de los análisis pueden ser calificados utilizando interpolaciones o extrapolaciones a partir de la suposición anteriormente expresada y que se presenta de manera gráfica en la figura 7.2.

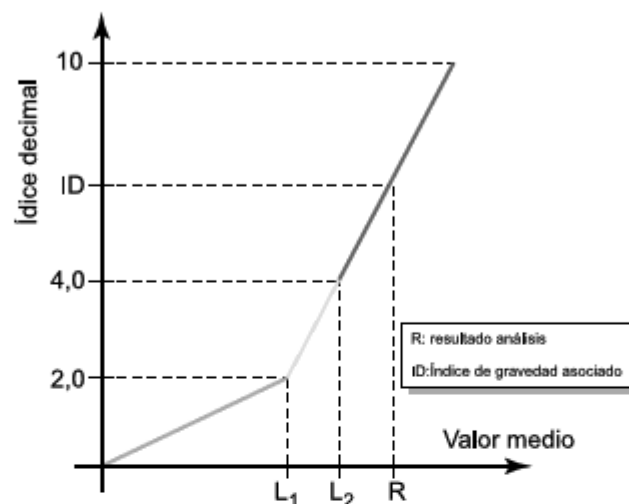


Figura 7.2. Modelo para la evaluación de los contaminantes en el aceite.

Con esto, siempre se cumple, independientemente del análisis realizado que un valor de índice decimal inferior a 2,0 se considera como correcto y tanto más correcto cuanto más bajo sea dicho valor. El rango de alerta siempre estará definido entre 2,0 y 4,0 y para el resultado concreto de un análisis su posicionamiento exacto será indicativo si está más cerca del estado correcto (próximo a 2,0) o del estado de alarma (más próximo a 4,0). Por encima del nivel o índice decimal 4,0 el parámetro se encuentra en alarma y tanto más grave cuanto mayor sea su índice decimal, hasta el máximo definido de 10.

7.3.2 Escalas relativas.

Determinadas propiedades del aceite: viscosidad, TBN, TAN, conviene ser analizadas de forma comparativa frente a los valores iniciales que las mismas presentan en el aceite nuevo, aunque en algunos casos como hemos visto anteriormente, los propios fabricantes de motor u otros autores los evalúan a partir de valores fijos definidos. Consideramos más acertada la evaluación de forma comparativa y es por ello que utilizaremos esta forma.

Tormos, Bernardo. Diagnóstico de motores diesel mediante el análisis del aceite usado.

España: Editorial Reverté, 2005.

ebrary collections. 28 May. 2014

Copyright © 2005. Editorial Reverté. All rights reserved.

May not be reproduced in any form without permission from the publisher, except fair uses permitted under U.S. or applicable copyright law.

En todos los casos la expresión que permite la evaluación de estos parámetros es la siguiente:

$$Z = \frac{\text{Valor parámetro medido}}{\text{Valor parámetro original}} \quad (7.1)$$

Los límites L_1 y L_2 aplicables a este tipo de análisis se establecen por tanto en función del parámetro Z definido anteriormente y la propiedad concreta de que se trate. Además se pueden establecer diferentes criterios adicionales, como ejemplo para el caso de la viscosidad, debido a que puede presentar variaciones tanto hacia valores superiores respecto a su valor original como inferiores habrá que definir por tanto valores superiores o inferiores.

Adicionalmente podemos definir límites atendiendo al tipo de aceite, definiendo así escalas para aceites multigrado, monogrado o incluso para grados específicos concretos. En la figura 7.3 se ve un ejemplo concreto.

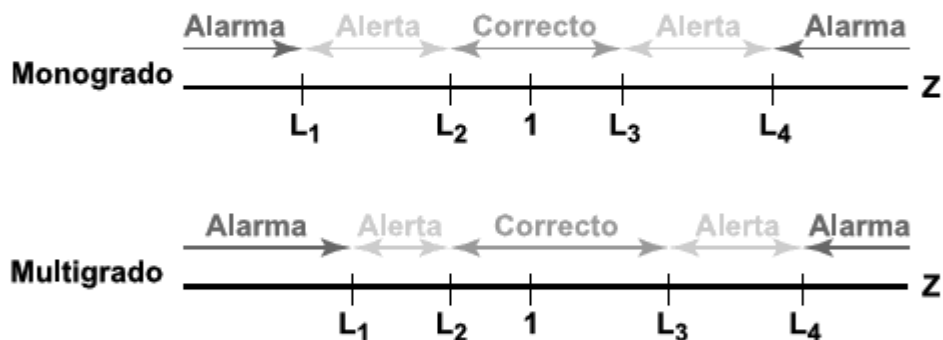


Figura 7.3. Esquema de la utilización de las escalas relativas. Ejemplo de aplicación al parámetro evaluador de la viscosidad y diferenciando por tipos de aceites: monogrado y multigrado.

El establecimiento del nivel de gravedad o índice decimal se realiza en este caso de forma análoga a como se ha descrito en el punto anterior.

7.3.3 Escalas de evaluación por tendencias

El método de evaluación considerado adecuado para evaluar el nivel de desgaste del motor va a ser la evaluación por tendencias, de modo que se pueda realizar un seguimiento de lo que es el comportamiento normal del motor y

podamos comprobar cuando este comportamiento se ve alterado debido a una situación anormal.

Anteriormente hemos presentado la metodología de cara a obtener la tasa de desgaste de un determinado elemento metálico en el motor a partir de las mediciones de las concentraciones del mismo en las muestras. Ahora presentamos el modo de evaluar si esa tasa de desgaste obtenida resulta de un comportamiento que puede considerarse normal o viene como consecuencia de algún problema que está dando como resultado un desgaste anormal.

La caracterización de la tasa de desgaste obtenida a partir de las concentraciones metálicas medidas en las muestras de aceite de un motor, debe tener en cuenta la desviación con respecto a lo que se considera su tasa de desgaste normal; esta es la razón por la cual se elige un parámetro característico de comparación Z que se define como:

$$Z = \frac{T_d [\text{motor}] - T_d [\text{normal motor}]}{T_d [\text{normal modelo}]} \quad (7.2)$$

deonde la tasa de desgaste obtenida en la muestra en estudio es $T_d[\text{motor}]$, el valor medio de la tasa de desgaste durante la vida de ese motor se representa por $T_d[\text{normal motor}]$, y $T_d[\text{normal modelo}]$ es el valor medio de la tasa de desgaste de los motores pertenecientes al mismo modelo de motor (de un mismo fabricante).

En la ecuación (7.2) no sólo se tiene en cuenta lo establecido en el párrafo anterior, sino que al adimensionalizar con el valor medio de la tasa de desgaste del modelo, que es de suponer que se trata de un valor bastante estable y característico de los diferentes motores de un mismo modelo, se compara la tasa de desgaste propio del motor con la tasa de su modelo.

Con ello, la magnitud definida Z cuantifica la importancia de la tasa de desgaste del motor comparado con el comportamiento que se considera normal de su modelo, que no varía acusadamente aunque el motor presente sistemáticamente tasas anormales.

Determinación de los límites de la escala del parámetro Z

La tasa de desgaste en un motor en funcionamiento normal podemos asimilar que seguirá un comportamiento tal como marca la curva de la bañera [Huo, Y. 1997], esto es, una primera fase con tasas de desgaste relativamente

altas, correspondiendo con el periodo de rodaje, en el cual las superficies rozantes se van ajustando. En situación normal, en un periodo relativamente corto de tiempo, que debe superar esta primera fase de rodaje, la tasa de desgaste debe descender y fijarse en un valor que se mantendrá relativamente estable a lo largo de gran parte de la vida del motor; es el periodo de madurez en la curva de la bañera. Con el envejecimiento del motor, la tasa de desgaste empezará a aumentar de forma progresiva correspondiendo con la denominada fase de envejecimiento en la curva de la bañera.

Atendiendo a este comportamiento resulta lógico pensar que las tasas de desgaste presentes en el motor van a seguir una distribución de tipo normal alrededor de un valor medio considerado como tasa de referencia. En realidad se ajustarán más exactamente a una distribución log-normal teniendo en cuenta que tenemos un límite inferior de desgaste, esto es, no tendremos ningún motor que presente ausencia de desgaste.

Este comportamiento esperado en un motor se verá reflejado también para una población que englobe a todos los motores del mismo modelo (y por tanto de la misma marca), con lo que el parámetro Z seguirá una distribución tal como se presenta en la figura 7.4.

Para la definición de los límites aplicables al parámetro de comparación Z utilizaremos criterios estadísticos aplicados sobre la distribución que siguen sus valores, tal como proponen diferentes autores, [Espinoza, H. J.; 1990], [Fygueroa, S.; 1994], [Ontiveros, L. E.; 1995], así, a partir de los datos de que se disponen para una población muy amplia se pueden calcular periódicamente los valores límite, L_1 , y L_2 que delimitan el 90%, y 96% de la población presente en el histograma y se asocian dichos límites a los rango de alerta y alarma tal como se ha hecho anteriormente.

La forma más ajustada de calcular estos valores límites L , es a partir de un histograma con las muestras que se consideren adecuadas que definen un mismo comportamiento, así podemos agrupar y obtener límites asociados a una determinada marca de motor y un tipo determinado, para un usuario concreto atendiendo que su modo de trabajo es muy particular, por tipo de motor mas genérico de lo que sería una marca, etc. Es decir, con ello podemos ajustar los límites dependiendo de los condicionantes que más se ajusten en cada caso particular.

Tormos, Bernardo. Diagnóstico de motores diesel mediante el análisis del aceite usado.

España: Editorial Reverté, 2005.

ebrary collections. 28 May. 2014

Copyright © 2005. Editorial Reverté. All rights reserved.

May not be reproduced in any form without permission from the publisher, except fair uses permitted under U.S. or applicable copyright law.

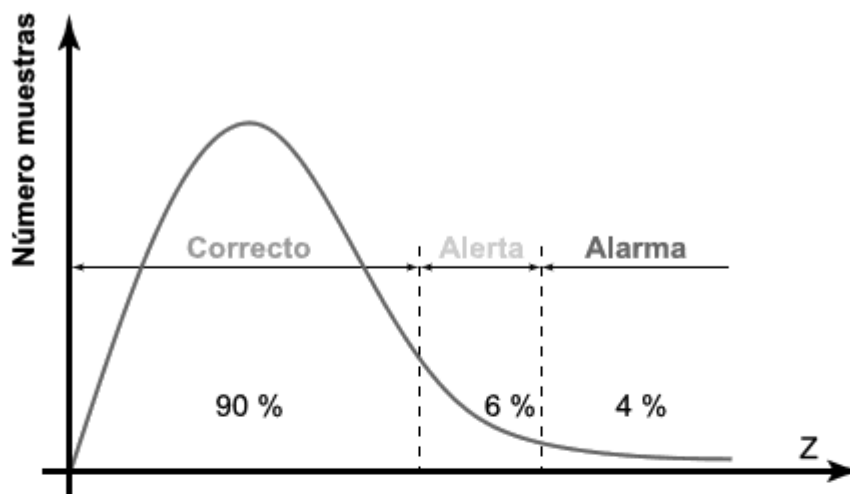


Figura 7.4. Distribución del parámetro Z para un determinado metal en un modelo concreto de motor.

Actualización de referencias de la tasa de desgaste.

La tasa de desgaste normal de un motor definida nos ofrece una idea del comportamiento normal de un motor específico y se usa para comparar y calificar las tasas de desgaste que se obtienen de sus muestras, como se ha visto anteriormente. Las tasas de desgaste de referencia asociadas a diferentes modelos se deben obtener mediante el estudio estadístico de una población de motores suficientemente numerosa para que sea representativa de la población. Comprobando que el comportamiento de las poblaciones puede considerarse como lognormal, se recomienda tomar como valor para las concentraciones de referencia, la media de la distribución lognormal.

Teniendo en cuenta que el comportamiento del desgaste en un motor es un fenómeno dinámico que se modifica a lo largo de la vida del mismo hay que definir una metodología de actualización de su propia referencia de desgaste de modo que se ajuste a dicho comportamiento dinámico. A continuación se expone el método de asignación y actualización de las tasas de desgaste de referencia, a partir de los valores que se obtienen en la evaluación de las correspondientes muestras. Se calcularán las cuatro referencias que se comentan a continuación.

Tormos, Bernardo. Diagnóstico de motores diesel mediante el análisis del aceite usado.

España: Editorial Reverté, 2005.

ebrary collections. 28 May. 2014

Copyright © 2005. Editorial Reverté. All rights reserved.

May not be reproduced in any form without permission from the publisher, except fair uses permitted under U.S. or applicable copyright law.

La **tasa de desgaste de referencia global**, que es la correspondiente a toda la población de muestras de aceite analizadas, teniendo en cuenta la influencia de todas las marcas, modelos y motores para un tipo de aplicación concreto, esto es, motores de Automoción, Marinos, o Cogeneración a gas.

La **tasa de desgaste de referencia de marca**, es la referencia que pertenece a una población de muestras de motores de un mismo fabricante.

La **tasa de desgaste de referencia de modelo** concierne a todas las muestras de un mismo modelo de motor, con la finalidad de tener en cuenta la existencia de distintos modelos dentro de los motores de un mismo fabricante.

La **tasa de desgaste de referencia de motor** es la correspondiente a un motor específico, y se obtiene a partir de sus propias muestras, es necesaria esta referencia, ya que cada motor está expuesto a distintas condiciones de uso y por ello tienen distinto comportamiento.

A continuación se detallan cada una de ellas explicando la expresión matemática que se utiliza para determinarlas.

- Tasa de desgaste de referencia del motor.

Se calcula a partir de las muestras de un motor en particular. La razón principal de la actualización de las referencias de cada motor es la de modificar el valor inicial asignado a éste, para llevar sus valores a unos más propios de su estado. La actualización de las referencias del motor se hará después de calcular el valor de la tasa de desgaste de la muestra en concreto (TD_m). La filosofía de la actualización consiste en atenuar la diferencia existente entre el valor de la tasa obtenido, y la referencia original (R_{MOT}) y corregirla:

$$R'_{MOT} = \frac{AR_{MOT} + TD_m}{A + 1} \quad (7.3)$$

donde R_{MOT} es la tasa de desgaste de referencia de motor original, R'_{MOT} es la tasa se desgaste de referencia de motor actualizada y A es un coeficiente de ponderación para tratar de corregir efectos que pueden ser contraproducentes, esto es, en el caso de que un comportamiento anormal puntual suceda, éste debe tratarse como tal y no debe de entrar a formar parte de los cálculos que ajustan la tasa de desgaste de referencia considerada como situación representativa. Se ha considerado óptima la asignación que se muestra en la tabla 7.5, en función del índice decimal (D), asignado en cada caso para cada análisis, indicativo del estado de la muestra.

Tormos, Bernardo. Diagnóstico de motores diesel mediante el análisis del aceite usado.

España: Editorial Reverté, 2005.

ebrary collections. 28 May. 2014

Copyright © 2005. Editorial Reverté. All rights reserved.

May not be reproduced in any form without permission from the publisher, except fair uses permitted under U.S. or applicable copyright law.

Es decir, que el valor de la tasa de desgaste de la muestra tendría un peso del 33 % si la muestra estuviera bien, un peso del 25 % en rango de alerta y del 20 % en rango de alarma siendo el índice menor de 5.

Se consideran situaciones poco normales que el valor de la tasa de desgaste obtenido sea menor de un tercio de la referencia considerada o sea superior al valor normal de la población tal que el índice decimal esté entre 4 y 5, si *no se trata de la primera muestra*, con lo que no se actualizará en dichos casos.

Tabla 7.5. Selección del parámetro de ponderación A en función de la calificación del estado de la muestra.

$TD_m \leq R_{MOT} / 3$		$D \leq 2$	$2 < D \leq 4$	$4 \leq D \leq 5$	$D \geq 5$	
1ª muestra	No 1ª muestra			1ª muestra	No 1ª muestra	
A = 4	No actualizar	A = 2	A = 3	A = 4	No actualizar	No actualizar

Si por el contrario se dan los casos anteriores pero se trata de la *primera muestra*, sí se actualiza pues es posible que el valor tomado como referencia sea poco adecuado y como consecuencia haya conducido a un cálculo de índices erróneo. Esto ocurre cuando la muestra viene de un motor del que no se tiene suficiente información sobre su comportamiento característico.

Si el índice decimal es mayor que 5 se considera muy alejado de lo considerado como normal, por lo que no debe considerarse para la actualización.

- Tasa de desgaste de referencia del modelo.

Se utiliza como valor inicial de referencia de las primeras muestras de cada motor que ingresan en el Sistema, por lo que se irá actualizando conforme lo hagan cada uno de los motores específicos de ese modelo. Esta actualización se realizará con la llegada de cada muestra de ese modelo para menor complejidad del Sistema.

La expresión a utilizar es:

$$R'_{MOD} = \frac{R_{MOT} + BR_{MOD}}{B + 1} \tag{7.4}$$

Tormos, Bernardo. Diagnóstico de motores diesel mediante el análisis del aceite usado.

España: Editorial Reverté, 2005.

ebrary collections. 28 May. 2014

Copyright © 2005. Editorial Reverté. All rights reserved.

May not be reproduced in any form without permission from the publisher, except fair uses permitted under U.S. or applicable copyright law.

donde R_{MOT} es la tasa de desgaste de referencia del motor al que pertenece la nueva muestra tras ser actualizada, R_{MOD} la tasa de desgaste de referencia del modelo de motor, R'_{MOD} la tasa de desgaste de referencia del modelo actualizada, y B el número total de muestras de ese modelo antes de actualizar.

Dicho coeficiente B podría ser fijo; sin embargo, actuando según la forma en que se ha definido, cuando el modelo tiene una población de motores reducida, este parámetro B tiene un valor bajo y permite una rápida adecuación del valor de referencia del modelo, partiendo del de la marca, mientras que una vez recibidas bastantes muestras, la referencia de modelo se hace más insensible a modificaciones tomando un valor casi constante.

Sin embargo se debe limitar el valor mínimo de B para impedir que si las primeras muestras fueran anormales se modificara exageradamente la referencia del modelo, y así se define:

$$B_{MIN} = 4$$

Por otra parte si el número de muestras recibidas se incrementa, B iría aumentando, perdiendo influencia las nuevas referencias de motor, por lo que se debe limitar el valor máximo de B :

$$B_{MAX} = 19$$

- Tasa de desgaste de referencia de marca.

La idea de tener una referencia por marca R_f es la de disponer de un valor promedio de todos los modelos de una marca, con el fin de usar dicha referencia como referencia inicial para un nuevo modelo de esa marca que ingresa en el sistema o cuando de los datos de la muestra sólo se conozca el fabricante del motor.

Esta referencia por marca se actualiza con las de los modelos que le pertenecen, como promedio de ellas, ponderadas de alguna forma con la cantidad de muestras recibidas de cada modelo, para lo que puede utilizarse el valor del coeficiente B de cada uno, tal como se definió anteriormente sin tener en cuenta los valores máximo y mínimo. La actualización sería de forma mensual y la expresión a utilizar será:

AEADE
ASOCIACIÓN ESPAÑOLA
DE ENTRENADORES DE AUTOMÓVILES



A N U A R I O 2 0 1 8



A N U A R I O **2 0 1 8**

EQUIPO AEADE



De izquierda a derecha arriba: Alberto Reza, Gabriel Guano, Julio Rodríguez, Stéfany Uzcátegui, Karla Reinoso, Byron Coronel, Genaro Baldeón, Doménica Zapata, Mauricio Larco, Vanessa Coronel, María de Fátima Miño, Richard Guano, Marco Villarreal.
De izquierda a derecha abajo: María Grazzia Pérez, Mónica Chipantasi, Doménica Pardo, Melany Corella, Bárbara Moya.



El sector automotor

en el contexto
internacional

El papel que cumple la industria automotriz en la economía de los países desarrollados

Behzad Saberi

Presidente de la economía nacional de la Universidad Rusa de la Amistad de los Pueblos, URAP, Rusia.

La industria automotriz es intensa, tanto a nivel de capital como de conocimiento. Desempeña un papel importante en el desarrollo socioeconómico de un país. En la actualidad, la industria está en auge: un creciente número de países se han sumado a la producción de automóviles, mientras que la alineación de fuerzas en el mercado automotor está cambiando constantemente. El papel de la industria automotriz en la evolución de la economía moderna y los prospectos de su desarrollo se determinan por el lugar del transporte motorizado en la infraestructura de la economía nacional. Este artículo habla sobre el progreso histórico de la industria automotriz en los países desarrollados, analiza la situación actual, expone previsiones y destaca sus principales tendencias.

Actualmente, es difícil imaginar el desarrollo de la economía de un país sin el de la industria automotriz. Según

la Organización Internacional de Constructores de Automóviles (OICA), en 2017, en el mundo, se fabricaron 73,4 millones de automóviles y 23,84 millones de camiones. Según los cálculos internacionales, la facturación anual promedio de la industria automovilística a nivel mundial es de más de 2,75 billones de euros, lo que corresponde al 3,65% del PIB mundial. En los últimos diez años (2007-2017), la industria automotriz tuvo un 25% de incremento en producción. Los automóviles son uno de los productos de exportación más importantes del mundo, superando los réditos del petróleo. Por ejemplo, en 2016 las exportaciones mundiales de automóviles por país se estimaron en 698,2 mil millones de dólares americanos. **La industria es también un agente principal de innovación, con la inversión de más de 84 mil millones de euros en investigación, desarrollo y producción.** Entre las 2500 empresas líderes en inversión en I+D, dominan tres sectores principales: productos farmacéuticos y biotecnología, producción de equipos de procesos y la industria automotriz. Vale recalcar que el ingreso fiscal de los fabricantes de automóviles en 26 países industrializados es de más de 430 mil millones de euros al año.

La industria automotriz consume acero, hierro, aluminio, plástico, vidrio, moquetas, textiles, chips informáticos, caucho y mucho más. Según las estadísticas, aproximadamente la mitad del consumo mundial de petróleo y caucho, alrededor de 1/4 de la producción de vidrio y 1/6 de la producción de acero se utiliza en esta industria y que hoy se ubica en segundo lugar, después de la construcción aeronáutica, en cuanto al volumen de consumo de productos de otras industrias. En la economía de los países desarrollados, el crecimiento de la industria automotriz del 1 % conlleva a un crecimiento del PIB del 1,5 %. El impacto indirecto en el PIB se fortalece a través de las industrias relacionadas por medio de las órdenes provenientes de la industria automotriz.

La industria automotriz en los países desarrollados es el campo principal de construcción de maquinaria.

No existe una sola potencia económica que no tenga una fuerte industria automotriz en su territorio. Por lo tanto, su porcentaje en el PIB de los países desarrollados oscila entre el 5 y el 10 %. La participación de este sector en la producción de maquinaria en Alemania es 14 %, en Japón 12 % y Corea del Sur 10 %. Un dólar invertido en la industria automotriz aumenta el producto interno bruto en USD 3 (multiplicador promedio). Según este indicador, no existe otra industria igual a la automotriz. Según varios pronósticos, para el 2030 el ingreso bruto para este sector será significativamente mayor. La industria producirá un ingreso adicional de 1,5 billones (un incremento del 30 % en los ingresos). Del mismo modo, los ingresos de las ventas tradicionales de automóviles, mantenimiento posventa y ventas de repuestos serán de aproximadamente 5,2 billones de dólares americanos. En 2015, esta cifra fue de solo 3,5 billones de dólares. Juntos, estos ingresos pueden acelerar el crecimiento anual de la industria automotriz en un 4,4 %. Su desempeño agregado ha logrado que OICA pueda compararse con la sexta economía más grande del mundo.

Los fabricantes modernos y expertos del mercado automotor prevén que las tasas de crecimiento anual de esta industria a escala mundial rodearán un 3,6%, lo que corresponde aproximadamente a la dinámica del PIB mundial.





PABLO CAMPANA: HACIA UN CAMBIO DE MODELO¹

AEADE: ¿Cuál es la línea de pensamiento detrás de la decisión del Gobierno nacional de promover una política a favor de los acuerdos comerciales con otros países u otros bloques?

Pablo Campana: La decisión del Gobierno de promover acuerdos comerciales se basa en la necesidad de un cambio de modelo que busca una inserción estratégica de Ecuador en los mercados internacionales y que tenga como pilares la atracción de inversiones y el fomento de las exportaciones.

Uno de los mecanismos para lograr la inserción es a través del impulso de la apertura de mercados para los productos de exportación de Ecuador.

¹ Pablo Campana Sáenz es Ministro de Producción, Comercio Exterior, Inversiones y Pesca de Ecuador.

Para ello se ha estructurado una hoja de ruta sobre la base de criterios como: tamaño de mercado, capacidad de ingreso, dinámica del consumo de los productos ecuatorianos, igualar las condiciones de competencia de los países competidores de nuestro país, profundización del intercambio comercial con la región, posibilidad de diversificar mercados, complementariedad productiva, entre otros factores, que coadyuven a que los acuerdos comerciales contribuyan a mayor inversión, generación de divisas, empleo y una mayor internacionalización de la economía ecuatoriana.

Los acuerdos comerciales ofrecen oportunidades pero también retos, en particular para aquellos productos que tienen ciertos grados de sensibilidad ante la apertura comercial. Estamos conscientes de esta realidad, por eso la política es que los acuerdos comerciales consideren elementos que permitan precautelar dichas sensibilidades, otorgar los plazos necesarios para que estos sectores se adapten.

De igual forma, con la fusión del Ministerio de Comercio con las carteras de Industrias y Pesca, se ha logrado tener y consolidar una política común entre los intereses comerciales y los productivos, de tal forma que los sectores productivos tengan certezas a mediano y largo plazo de una política comercial y productiva que mejore su competitividad y esté preparado para los procesos de apertura.

AEADE: ¿Puede mencionar cuáles son sus objetivos con respecto a los plazos que se ha puesto el Ministerio para concretar los acuerdos comerciales?

Pablo Campana: Los acuerdos comerciales tienen sus tiempos de negociación y dependen también de las contrapartes con las cuales se negocian; en ese contexto, esperamos concretar nuevos acuerdos de distinto alcance en los próximos dos años, tanto a nivel regional como extra regional, que brinden nuevas oportunidades a los sectores productivos del país.



2019: un año de desafíos para la economía en general

y para el sector automotor en particular

2019: un año de desafíos para la economía en general y para el sector automotor en particular

Por José Hidalgo Pallares, director general de CORDES

Según las últimas estimaciones disponibles al momento de redactar este artículo, en 2018 la economía ecuatoriana habría alcanzado una tasa de crecimiento apenas superior al 1%¹. Eso significa que en tres de los últimos cuatro años el crecimiento económico estuvo por debajo del crecimiento de la población, que ronda el 1,6% anual. Las proyecciones para 2019 no son mucho mejores: el Banco Central cree que este año la economía crecerá 1,4%, mientras que el FMI se muestra mucho menos optimista: su proyección es de 0,7%. Estas previsiones, que estarían dando cuenta de un pobre desempeño del consumo privado, anticipan un año de retos para el sector automotor, que también podría verse afectado, en el corto plazo, por la necesidad de corregir los desequilibrios que acarrea la economía ecuatoriana.

El bajo crecimiento económico esperado para 2019 se explica, en parte, por la necesidad de que el ajuste fiscal, que se ha limitado básicamente al gasto de inversión del Gobierno Central, se extienda también al gasto corriente y al resto del sector público (compuesto por gobiernos seccionales, seguridad social y empresas públicas). Pero ese no es el único motivo que permite anticipar un estancamiento en el

nivel de actividad. Hay otros dos desequilibrios que también se deben incluir en el análisis de la economía ecuatoriana para el presente año. El primero de ellos es coyuntural: desde 2017 los créditos que entregan los bancos han venido creciendo a un ritmo mucho mayor al de los depósitos y esto no se puede mantener así indefinidamente. El segundo desequilibrio es más estructural: por el fortalecimiento del dólar y también como consecuencia de medidas de política interna que elevaron los costos de producción, el Ecuador ha perdido competitividad frente a sus socios comerciales, lo que ha restado dinamismo a las exportaciones (medidas en volumen) y, a su vez, ha impulsado a las importaciones. Esto, sin embargo, tampoco es sostenible, ya que, ante la ausencia de otras fuentes permanentes de divisas, el déficit en la cuenta corriente de la balanza de pagos está provocando una caída sostenida en las reservas internacionales del Banco Central, que solo se recuperan cuando el Gobierno consigue financiamiento en el exterior.

El anuncio de que el Ecuador llegó a un acuerdo preliminar con el FMI es, sin dudas, una noticia importante, ya que un acuerdo de ese tipo, además de los fondos que genere (se habla de más de \$10.200 millones en desembolsos para los próximos tres años, \$4.200 millones procedentes del FMI y \$6.000 millones de otros multilaterales), podría empujar al Gobierno a tomar acciones más decididas para afrontar los desequilibrios fiscal y externo y así generar mejores condiciones económicas para los años subsiguientes. No obstante, si consideramos únicamente 2019, los compromisos que el Gobierno asuma con el FMI pueden tener impactos recesivos en el corto plazo y, en lo político, generar mayor conflictividad. A continuación se analiza, en mayor detalle, los impactos que la situación fiscal, externa y financiera, y las medidas que se tomen para corregirlas, pueden tener sobre el desempeño de la economía en general y del sector automotor en particular.



1 Tanto el Banco Central como el FMI estiman que en 2018 el crecimiento del PIB fue de 1,1%.

Ajuste fiscal

Una de las peores consecuencias de la expansión fiscal llevada a cabo por el gobierno anterior, más allá de la acumulación de déficits fiscales y el consecuente crecimiento de la deuda pública, fue que en los años de bonanza petrolera, cuando el gasto público llegó a representar el 44% del PIB, la economía en su conjunto desarrolló una suerte de dependencia hacia el Estado. Es decir, la economía se mostraba más dinámica cuando el gasto público se expandía, pero a la vez el nivel de actividad se desaceleraba o incluso se contraía si había un ajuste fiscal, como el que se dio a raíz de la caída del precio del petróleo. Esta dependencia de la economía en su conjunto hacia el gasto público, que no se percibía en los primeros años de dolarización, explica en parte el pobre

crecimiento del PIB en 2018. En ese año, según información del Ministerio de Economía y Finanzas, el gasto del Presupuesto General del Estado (PGE, que se refiere básicamente al Gobierno Central) se contrajo 1,3% respecto a 2017 (Tabla 2). No obstante, si se analiza solo el gasto de capital el ajuste fue mucho mayor: 21%. A su vez, ese resultado se explica por una caída de más del 40% en el gasto de inversión que ejecuta directamente el Gobierno, mientras que las transferencias de capital a los gobiernos seccionales siguieron creciendo (17,3%). También siguió creciendo el gasto corriente, que en 2018 fue casi 10% mayor que en 2017. Si bien una buena parte de ese crecimiento se explica por el aumento de las transferencias y el pago de intereses (rubros sobre los que el Gobierno tiene poco control), también creció el gasto en sueldos, salarios y en bienes y servicios de consumo.

Pese a esto, el déficit del PGE mostró en 2018 una notable reducción frente a 2017. Eso respondió no solo al ya mencionado ajuste en el gasto de inversión, sino también a un crecimiento de 11,1% en los ingresos, que a su vez se explica principalmente por un aumento en los ingresos tributarios y petroleros.

Para 2019 el Gobierno espera seguir reduciendo el déficit del PGE, que según las estimaciones oficiales cerraría el año en \$3.637 millones, es decir, 2,9% menos que en 2018. Para llegar a ese resultado el Gobierno prevé un crecimiento de 10,3% en los ingresos totales que permitiría más que compensar el alza de 8,2% en los gastos. No obstante, las proyecciones oficiales en cuanto a los ingresos lucen demasiado optimistas. En primer lugar, el Gobierno espera que los ingresos tributarios en este año sean mayores que en el anterior, pese a que las propias proyecciones oficiales hablan de un modesto crecimiento económico y, sobre todo, pese a que la mayor parte de los \$1.101 millones que, según el SRI, se recaudaron por concepto de la remisión tributaria se concentraron en 2018. Si bien el acuerdo con el FMI puede incluir también una reforma tributaria,

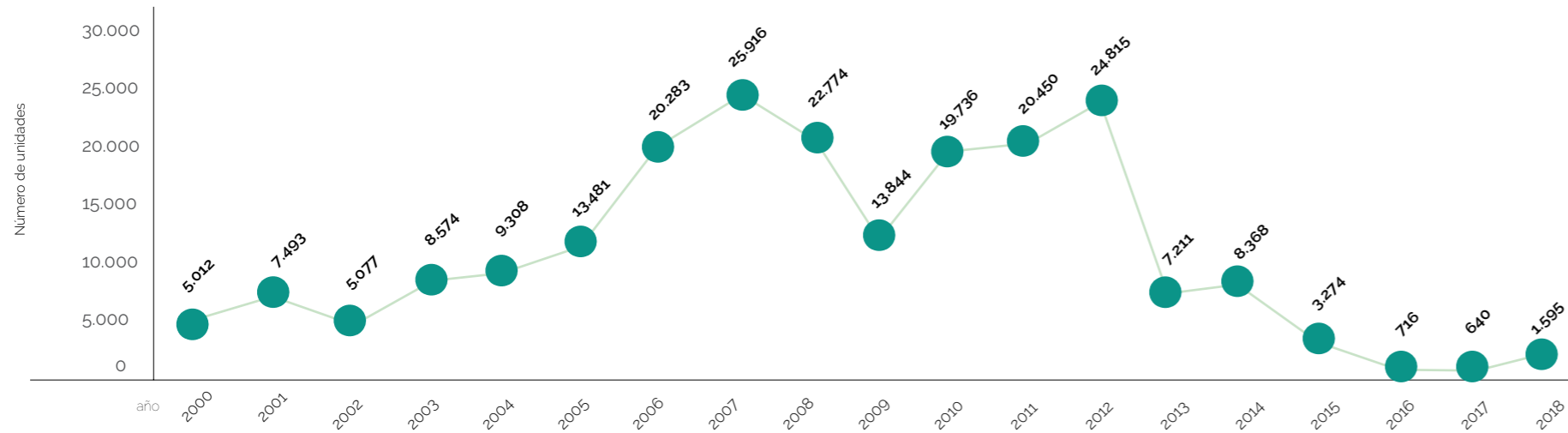
Tabla 2. Ejecución del PGE 2018 vs 2017

	2017	2018	2018 / 2017
Ingresos	18.256	20.280	11.1%
Tributarios	13.849	15.002	8.3%
Petroleros	1.579	1.979	25.3%
No tributarios	2.105	2.331	10.7%
Otros	723	968	33.9%
Gastos	24.347	24.027	-1.3%
Corriente	15.664	17.168	9.6%
Sueldos	9.140	9.451	3.4%
Bienes y servicios	2.116	2.419	14.3%
Transferencias ctes.	1.687	2.016	19.5%
Intereses	2.516	3.027	20.3%
Otros ctes.	205	255	24.4%
De capital	8.683	6.859	-21.0%
GADs	3.060	3.588	17.3%
Otros	5.623	3.271	-41.8%
Déficit	(6.091)	(3.747)	-38.5%
Déficit primario	(3.575)	(720)	-79.9%

Fuente: Ministerio de Economía y Finanzas, Observatorio de la Política Fiscal

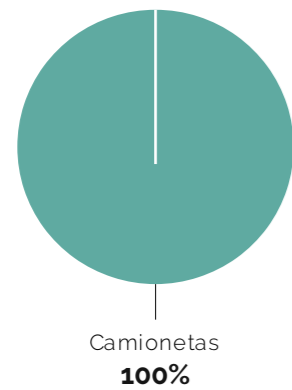
Exportación anual de vehículos en Ecuador

2000-2018
Unidades



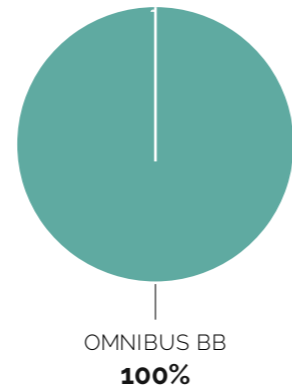
Exportación de vehículos por segmento

2018
% de participación



Exportación de vehículos por ensambladora

2018
% de participación



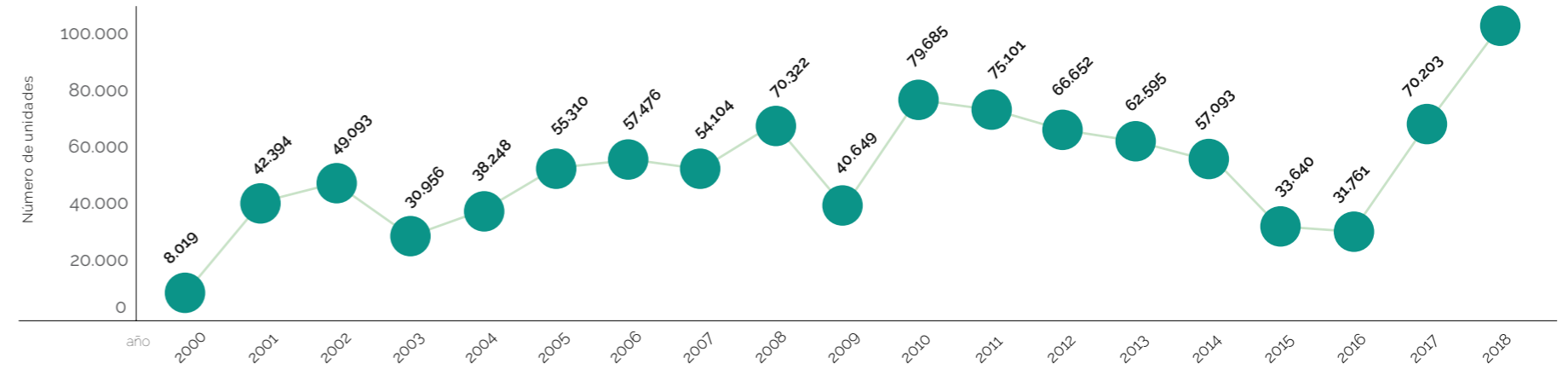
Exportación anual de vehículos por ensambladora y segmento

En unidades, 2015-2018

Ensambladora*	Camionetas				Automóviles				SUV				Van				Total			
	2015	2016	2017	2018	2015	2016	2017	2018	2015	2016	2017	2018	2015	2016	2017	2018	2015	2016	2017	2018
AYMESA	-	-	-	-	730	-	-	-	400	-	-	-	-	-	-	-	1130	-	-	-
OMNIBUS BB	2.144	716	640	1.595	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.144	716	640	1.595
Total	2.144	716	640	1.595	730	-	-	-	400	-	-	-	-	-	-	-	3.274	716	640	1.595

Importación anual de vehículos

2000-2018
Unidades



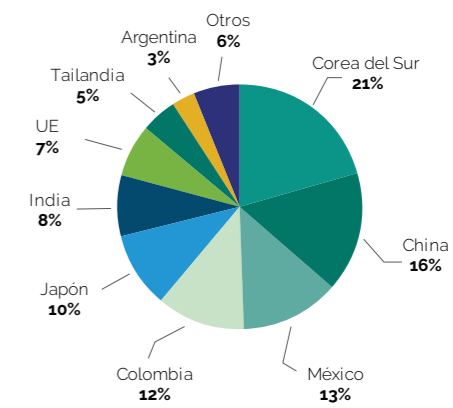
Importación anual de vehículos por segmento

En unidades, 2000-2018

Año	Automóviles	SUV	Camionetas	Camiones	VAN	Buses	Total
2000	4.137	1.491	1.277	923	85	106	8.019
2001	21.213	5.153	5.136	7.533	2.491	868	42.394
2002	25.403	5.714	6.078	8.152	2.807	939	49.093
2003	14.830	4.317	3.779	5.063	2.384	583	30.956
2004	19.979	6.251	4.289	5.358	1.754	617	38.248
2005	31.870	10.301	3.138	6.927	2.276	798	55.310
2006	30.525	11.555	4.379	8.375	1.678	964	57.476
2007	22.485	13.401	6.212	9.081	1.879	1.046	54.104
2008	32.585	13.569	9.038	12.654	1.915	561	70.322
2009	15.709	12.779	5.343	5.327	919	572	40.649
2010	38.418	15.807	13.964	7.390	2.938	1.168	79.685
2011	32.090	15.088	9.782	11.148	5.264	1.729	75.101
2012	27.545	12.908	10.064	11.930	2.692	1.513	66.652
2013	20.099	14.945	6.292	14.281	5.082	1.896	62.595
2014	18.820	14.530	5.292	12.615	5.367	469	57.093
2015	10.846	8.107	2.948	8.716	2.672	351	33.640
2016	13.145	8.213	2.242	4.378	2.358	1.425	31.761
2017	30.956	22.698	6.304	5.046	3.455	1.744	70.203
2018	44.218	35.079	8.026	7.766	4.886	1.441	101.416

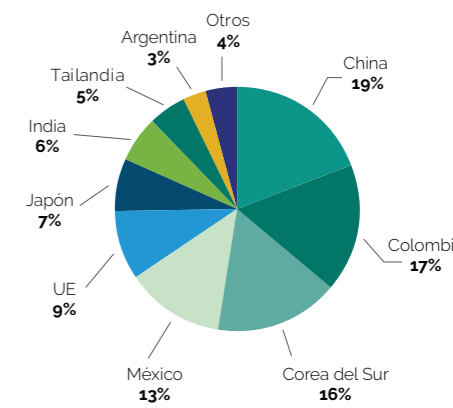
Importación de vehículos por origen

2017
% de participación



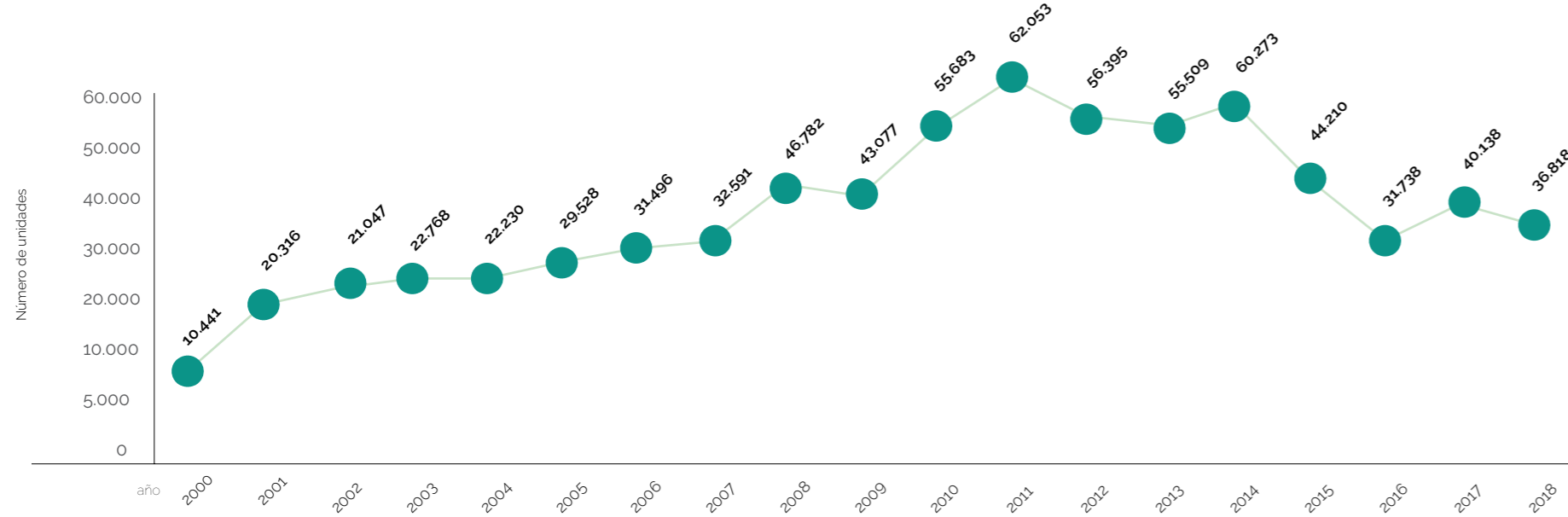
Importación de vehículos por origen

2018
% de participación



Venta anual de vehículos ensamblados en Ecuador

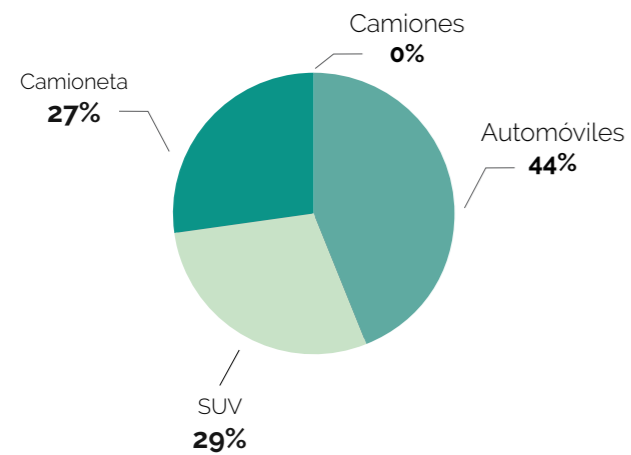
2000-2018
Unidades



Venta de vehículos por segmento

2018

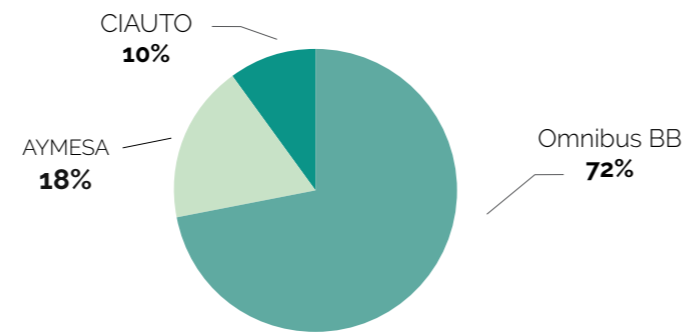
% de participación



Venta de vehículos por ensambladora

2018

% de participación



Venta anual de vehículos ensamblados en unidades por ensambladora y segmento, 2015-2018

Ensambladora*	Automóviles				SUV				Camionetas				Camión				Total			
	2015	2016	2017	2018	2015	2016	2017	2018	2015	2016	2017	2018	2015	2016	2017	2018	2015	2016	2017	2018
AYMESA	1.631	975	995	294	2.836	2.103	5.356	5.633	-	-	-	773	-	-	-	16	4.467	3.078	6.351	6.716
CIAUTO	-	-	-	-	1.159	1.718	2.187	2.562	1.005	797	1.361	1.143	55	-	-	-	2.219	2.515	3.548	3.705
MARESA	-	-	-	-	-	-	-	-	3.375	2.079	144	-	-	-	-	-	3.375	2.079	144	-
OMNIBUS BB	17.862	14.396	18.500	15.899	8.544	3.647	3.631	2.462	7.743	6.023	7.964	8.036	-	-	-	-	34.149	24.066	30.095	26.397
Total	19.493	15.371	19.495	16.193	12.539	7.468	11.174	10.657	12.123	8.899	9.469	9.952	55	-	-	16	44.210	31.738	40.138	36.818

Todo es más fácil *cuando* alguien te acompaña a tu destino.



Asegúrate: Rápido y...



SEGUROS:

■ AUTOS ■ HOGAR ■ VIDA ■ EMPRESAS

MAPFRE | ATLAS

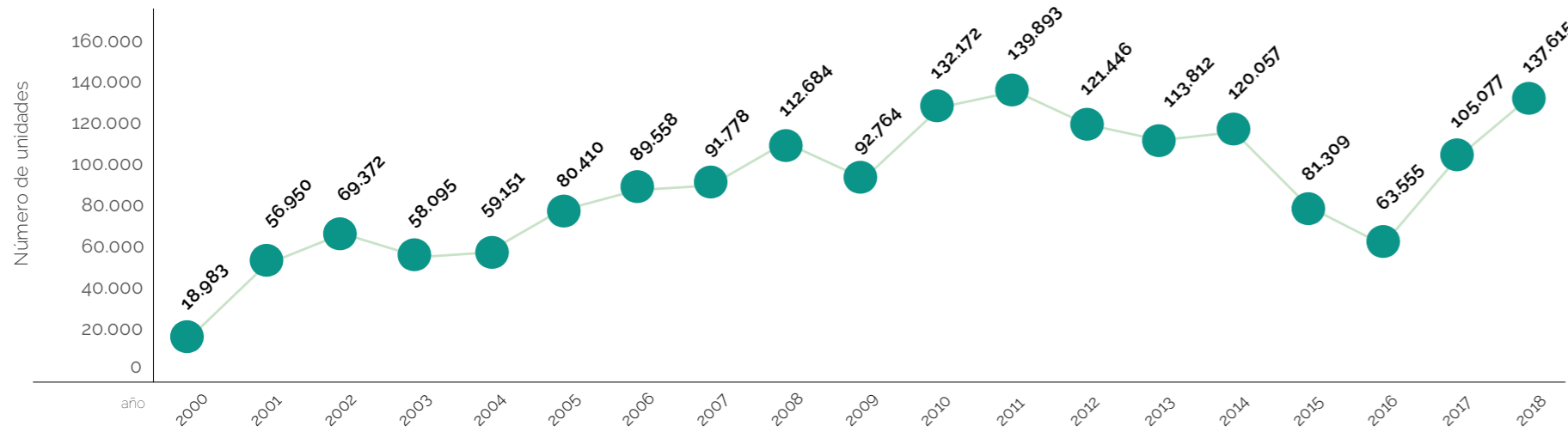
Tu aseguradora global de confianza

www.mapfreatlas.com.ec

Ventas anuales de vehículos

2000-2018

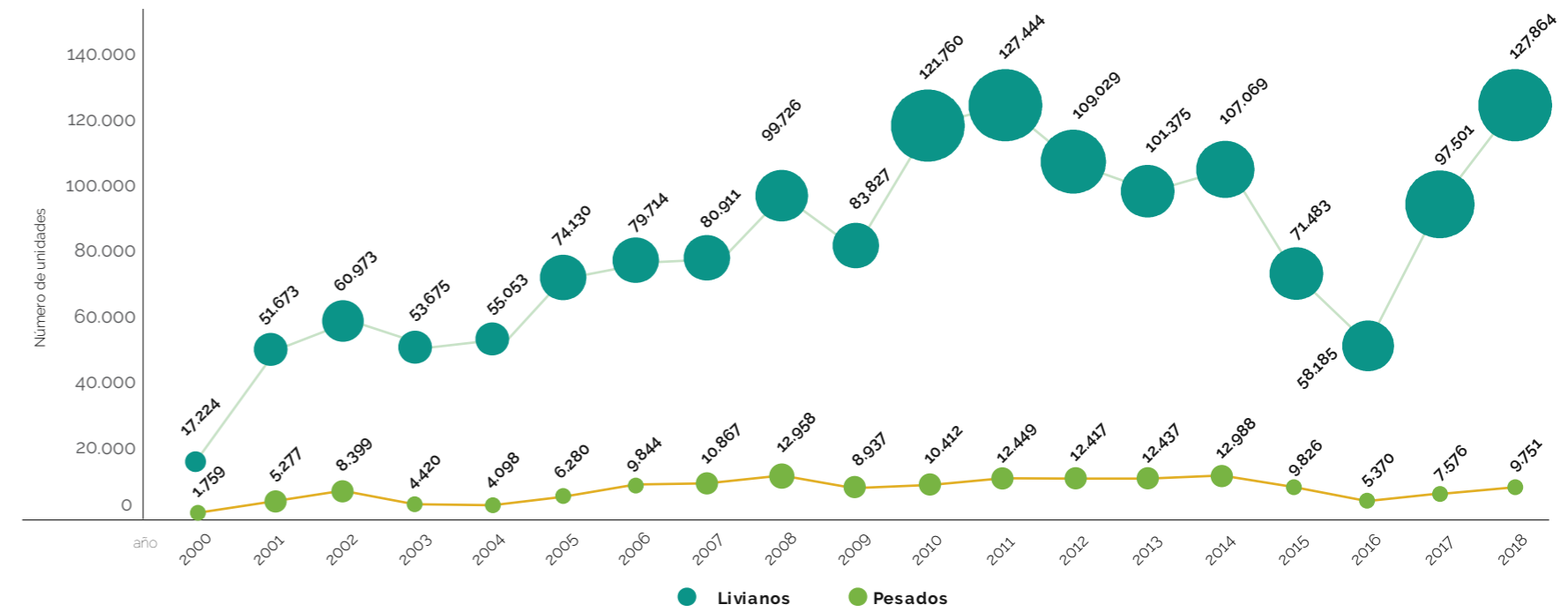
Unidades



Ventas anuales de vehículos livianos y pesados

2000-2018

Unidades



Composición de las ventas de vehículos En unidades / porcentaje de participación 2000-2018					
Año	Ensamblaje local	%	Importación	%	Total
2000	10.441	55,00%	8.542	45,00%	18.983
2001	20.316	35,67%	36.634	64,33%	56.950
2002	21.047	30,34%	48.325	69,66%	69.372
2003	22.768	39,19%	35.327	60,81%	58.095
2004	22.230	37,58%	36.921	62,42%	59.151
2005	29.528	36,72%	50.882	63,28%	80.410
2006	31.496	35,17%	58.062	64,83%	89.558
2007	32.591	35,51%	59.187	64,49%	91.778
2008	46.782	41,52%	65.902	58,48%	112.684
2009	43.077	46,44%	49.687	53,56%	92.764
2010	55.683	42,13%	76.489	57,87%	132.172
2011	62.053	44,36%	77.840	55,64%	139.893
2012	56.395	46,44%	65.051	53,56%	121.446
2013	55.509	48,77%	58.303	51,23%	113.812
2014	60.273	50,20%	59.784	49,80%	120.057
2015	44.210	54,37%	37.099	45,63%	81.309
2016	31.738	49,94%	31.817	50,06%	63.555
2017	40.138	38,20%	64.939	61,80%	105.077
2018	36.818	26,75%	100.797	73,25%	137.615

Ventas anuales de vehículos por segmento En unidades, 2000-2018							
Año	Automóviles	SUV	Camionetas	Camiones	Van	Buses	Total
2000	7.645	4.514	4.588	1.527	477	232	18.983
2001	22.936	13.541	13.765	4.580	1.431	697	56.950
2002	29.296	12.910	16.103	7.290	2.664	1.109	69.372
2003	27.565	9.050	14.113	3.837	2.947	583	58.095
2004	28.474	10.009	14.198	3.557	2.372	541	59.151
2005	41.695	12.647	17.734	5.264	2.054	1.016	80.410
2006	42.932	15.968	19.251	8.669	1.563	1.175	89.558
2007	38.565	19.769	20.660	9.570	1.917	1.297	91.778
2008	46.846	22.710	27.963	11.521	2.207	1.437	112.684
2009	35.869	24.727	21.336	7.919	1.895	1.018	92.764
2010	57.278	32.972	27.808	9.180	3.702	1.232	132.172
2011	62.585	31.712	27.469	10.788	5.678	1.661	139.893
2012	53.526	27.118	23.922	10.954	4.463	1.463	121.446
2013	47.102	27.067	22.047	11.085	5.159	1.352	113.812
2014	47.596	31.025	23.262	11.594	5.186	1.394	120.057
2015	30.344	21.664	15.071	8.263	4.404	1.563	81.309
2016	27.771	17.045	11.071	3.948	2.298	1.422	63.555
2017	45.696	33.736	15.203	5.722	2.866	1.854	105.077
2018	58.854	45.139	19.464	7.844	4.407	1.907	137.615