

Análisis de la salud, contaminación y desgaste del lubricante de motor. Caso: Bus inter aeroportuario

Analysis of engine oil condition based on health, contamination and wear. Case: Airport shuttle bus



Jaime Fernando Antamba Guasguá¹

✉ <https://orcid.org/0000-0001-9666-9873>

Pablo André Vacacela Mazón¹

✉ <https://orcid.org/0009-0009-2077-3995>

Angel Orlando Lluilema Vimos²

✉ <https://orcid.org/0009-0005-4143-0722>

Luis Fabricio Corrales Zurita³

✉ <https://orcid.org/0000-0001-5010-6194>

¹Instituto Tecnológico Superior Rumiñahui; Rumiñahui - Ecuador; CP 170101

²Universidad Internacional del Ecuador (UIDE); Quito - Ecuador; CP 170503

³Gobierno Autónomo Descentralizado (GAD); Azogues - Ecuador; CP 030150

✉ jaime.antamba@ister.edu.ec

DOI: <https://doi.org/10.26423/njb3gs46>

Páginas: 80- 89

Resumen

El estudio se orientó en evaluar en condiciones operativas reales, la salud, la contaminación y el desgaste del aceite de motor de un bus inter aeroportuario; se planteó que, con un monitoreo sistemático y correcciones operacionales, las propiedades del lubricante se mantendrían dentro de límites permisibles. Se aplicó un diseño experimental descriptivo con tres muestreos cada 250 h (0–750 h). Las pruebas de laboratorio analizaron viscosidad (ASTM D445), FTIR para oxidación, sulfatación, nitración y contaminantes (ASTM E2412), ICP para metales y aditivos (ASTM D5185) y agua por Karl Fischer (ASTM D4928), y en el análisis de datos se usaron límites permisibles y criterios estadísticos (ASTM D7720). Los resultados mostraron disminución de viscosidad del 13–14% en relación a la línea base, en la oxidación se mantuvo en 16; la sulfatación, alta y estable en 21; la nitración, 6–7, todas bajo límites establecidos; a la vez, no se registró ningún contaminante en las muestras. En el caso de las partículas se detectó Fe=3–4 ppm, Al=0–1 ppm y Cu=1 ppm, con Mo=41 ppm por aditivo y descenso controlado de Ca–P–Zn. Se concluye que el aceite mantuvo su capacidad protectora dentro del periodo de medición. Finalmente, el mantenimiento basado en condición es viable lo que permite optimizar el intervalo de cambio del aceite con impacto posible en costos, confiabilidad y cumplimiento ambiental.

Palabras clave: monitoreo bajo condición; ingeniería de mantenimiento; tribología; motor encendido por compresión.

Abstract

The study evaluates engine oil condition based on health, contamination, and wear of an airport shuttle bus under real-life operating conditions. It was proposed that, with systematic monitoring and operational corrections, the lubricant properties would be maintained within permissible limits. A descriptive experimental design was applied with three samplings every 250 h (0–750 h). Laboratory tests analyzed viscosity (ASTM D445), FTIR for oxidation, sulfation, nitration, and contaminants (ASTM E2412), ICP for metals and additives (ASTM D5185), and water by Karl Fischer (ASTM D4928). Permissible limits and statistical criteria (ASTM D7720) were used in data analysis. The results showed a 13–14% decrease in viscosity compared to the baseline; oxidation remained at 16; sulfation was high and stable at 21. Nitration, 6–7, all within established limits; at the same time, no contaminants were recorded in the samples. In the case of particles, Fe = 3–4 ppm, Al = 0–1 ppm and Cu = 1 ppm were detected, with Mo = 41 ppm per additive and a controlled decrease in Ca–P–Zn. It is concluded that the oil maintained its protective capacity within the measurement period. Finally, condition-based maintenance is viable, allowing for optimization of the oil change interval with potential impacts on costs, reliability and environmental compliance.

Keywords: condition monitoring system; maintenance engineering; tribology; CI engine.

Recepción: 24/09/2025 | Aprobación: 10/11/2025 | Publicación: 26/12/2025

1. Introducción

En general, el aceite de motor desempeña un papel importante en la vida útil del motor, por medio de la lubricación del motor permite reducir la fricción entre las piezas que se impactan. También refrigerar las diversas piezas, como los cojinetes del cigüeñal y los pistones. Además, permite la limpieza del motor y ayuda a prevenir la corrosión de sus componentes, estas condiciones, conllevan la degradación del aceite de motor generando un deterioro químico del mismo. Este fenómeno se produce cuando el aceite base se combina con oxígeno, azufre y nitrógeno, formando compuestos nocivos al interior del motor, siendo una de las causas del desgaste de los elementos internos del motor de combustión interna (1, 2, 3, 4). Por ello, el periodo de vida útil de un motor de combustión es afectado por la calidad de aditivos del lubricante y del intervalo de mantenimiento del vehículo (5). Además, la degradación del aceite de motor acelera el desgaste y la corrosión en los motores, lo que provoca fallos y reduce el rendimiento (6). Las propiedades del aceite como la viscosidad, el nivel de hollín, el índice de acidez total (TAN) y el índice de base total (TBN) son los indicadores representativos de la calidad del aceite de motor. La viscosidad mide la fluidez del aceite a una temperatura determinada, lo que significa su capacidad para lubricar los metales en contacto, en este caso, la temperatura afecta la viscosidad del aceite de motor. En condiciones de alta temperatura hace que el aceite sea más líquido, y al enfriarse, el aceite se vuelve más espeso (7, 8). El hollín se forma durante los procesos de combustión y entra en el cárter con los gases de combustión, por lo tanto, los niveles de hollín generalmente aumentan con el kilometraje y el consumo de combustible. El exceso de hollín aumenta la viscosidad del aceite, lo que provoca temperaturas más altas, mayores costos de bombeo, pérdida de potencia y el riesgo de falta de aceite, especialmente en el arranque en frío. El TAN indica el estado básico del aceite de motor al proporcionar un valor sobre el grado de oxidación que ha sufrido, en cambio, el TBN es un parámetro crítico para determinar la eficacia del aceite en la protección del motor contra los ácidos formados durante la combustión (1, 9, 10).

En la práctica, los fabricantes de equipos originales (OEM) para vehículos, los proveedores de lubricantes y los laboratorios de análisis de aceite proporcionan información sobre los límites permisibles de metales de desgaste que facilita la interpretación de los resultados obtenidos de una muestra de aceite, sin embargo, la interpretación puede sesgarse, al no considerar los factores operacionales y las características particulares como la antigüedad del motor, el tipo de servicio, las condiciones ambientales (1, 11, 12, 13).

En la actualidad, los métodos tradicionales de mantenimiento son inefficientes, ya sea por la frecuencia excesiva de los cambios de aceite o por el riesgo de dañar el motor debido a cambios tardíos (14). En contraste, enfoques de mantenimiento basado en condición (CBM) apoyados por los análisis de aceite permiten la optimización de los intervalos de servicio y la reducción de costos. Estudios recientes con analítica avanzada muestran que variables como kilometraje del aceite, cilindrada y uso acumulado del vehículo son determinantes para modelar la degradación, mientras que características de tamaño o tipología de flota aportan menos información, induciendo políticas predictivas idóneas (15).

Aunque el análisis de aceite se ha utilizado ampliamente en el mundo existen brechas metodológicas por la complejidad de la cuantificación del desgaste categorizado en tres partes: en primer lugar, los problemas relacionados con las limitaciones de las técnicas de medición utilizadas para la cuantificación del desgaste, para ello, se han desarrollado diversos métodos para determinar y cuantificar la presencia de elementos contaminantes en el aceite causados por el desgaste del motor y la espectrometría es sin duda el método más utilizado. En segundo lugar, los efectos de las condiciones de funcionamiento en las mediciones de desgaste; debido a que no siempre se correlaciona con el desgaste real que se pretende medir, por lo tanto, las mediciones se ven afectadas por diferentes factores que deben compensarse o tenerse en cuenta para lograr un análisis de desgaste adecuado. Por último, las características específicas del motor (fabricante, antigüedad del motor, condiciones ambientales, tipo de servicio, las condiciones ambientales de trabajo, la metalurgia del motor, etc.), siendo estos factores difíciles de evaluar (16, 17, 18, 19). Paralelamente, técnicas como la espectroscopía infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR) han ganado relevancia por la rapidez y bajo costo para estimar oxidación, nitración, sulfatación, hollín, agua, dilución de combustible y rastros de refrigerante y aditivos, complementando o confirmando los métodos tradicionales y reduciendo la incertidumbre diagnóstica y la aplicación de los procedimientos de mantenimiento (20) (21).

Bajo este contexto, se identifica la necesidad de estudios aplicados sobre la operación de flotas vehiculares con ciclos particulares, como los buses intra aeroportuarios, que operan con largos períodos a bajo régimen de giro del motor y frecuentes arranques/paradas, cuya combinación de baja temperatura de gases, marcha lenta y potencial dilución de combustible establecen un modo característico de la evolución de viscosidad, TAN/TBN, oxidación, sulfatación, nitración y condiciones de desgaste. La evidencia disponible para buses urbanos es útil pero no concluyente para este microciclo específico (1) y la literatura metodológica enfatiza la necesidad de criterios de interpretación ajustados al servicio (13). Este trabajo se enfocó en la evaluación de salud, contaminación y desgaste del aceite de motor utilizado en un bus de uso intra aeroportuario bajo condiciones operativas reales en intervalos de 250 horas de operación, aplicando la técnica de análisis de aceites FTIR y ICP, con la finalidad de sustentar las decisiones de mantenimiento basado en condición y la generación de mejoras en los intervalos de cambio. Bajo las consideraciones realizadas se hipotetiza que los cambios de las propiedades fisicoquímicas del lubricante pueden mantenerse dentro de los umbrales operativos si el programa de monitoreo es sistemático y se interpretan los resultados corrigiendo los factores operacionales.

2. Materiales y Métodos

Este proceso de investigación fue un estudio experimental tipo descriptivo, orientado en el análisis de la salud, contaminación y degradación de los motores de encendido por compresión de un vehículo de transporte inter aeroportuario. Este proceso se llevó a cabo en la ciudad de Quito, ubicada en una zona geográfica de elevación a 2 800 metros sobre el nivel del mar. El procedimiento de trabajo utilizado, se muestra en la Figura 1.

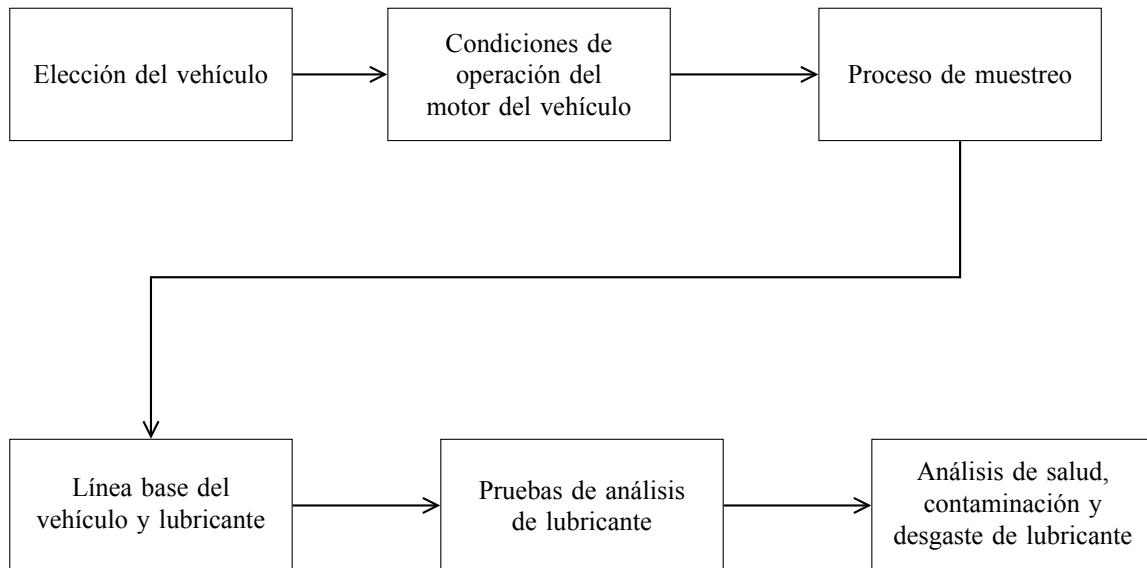


Figura 1: Procedimiento de trabajo

Nota: El procedimiento de trabajo se basa en los trabajos descritos por Macián *et al.* (13), Antamba *et al.* (5) y Tormos (22) aplicables a los motores de encendido por compresión.

Dentro las actividades operativas del aeropuerto, se dispone de buses para el transporte de los pasajeros desde el avión hacia la plataforma, lo que implica la operación del bus en condiciones de bajo régimen de giro del motor debido a las regulaciones de velocidad dentro del perímetro interno del aeropuerto. En este caso el vehículo elegido dispone de un motor de encendido por compresión de un volumen total de

siete litros, con sistema de inyección de riel común (CRDI), de seis cilindros en línea con turbocargador, intercooler e inyección de combustible electrónicamente controlado, para una potencia máxima de 213 kW a 2 300 rpm, a la vez, diseñado para el cumplimiento de las emisiones Euro 4. Los parámetros de operación se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1: Parámetros de operación del motor del vehículo elegido

| Parámetro | Valor |
|--|-------|
| Régimen de giro a ralentí [rpm] | 600 |
| Velocidad promedio del vehículo [km/h] | 15 |
| Presión atmosférica [kPa] | 78 |
| Presión de aceite [kPa] | 328 |
| Consumo combustible [l/km] | 31,2 |

A. Proceso de muestreo

Para el desarrollo del proyecto, se eligió el periodo de mantenimiento como base para el proceso de muestreo, corresponde a un periodo de funcionamiento de 250 horas

del motor del vehículo. El cambio de aceite de motor es una actividad esencial del mantenimiento preventivo, por ello se tomaron tres muestras de aceite en el cárter del motor en intervalos de 250 horas. La secuencia de muestreo se establece acorde la norma ASTM 5 185, según la Figura 2.

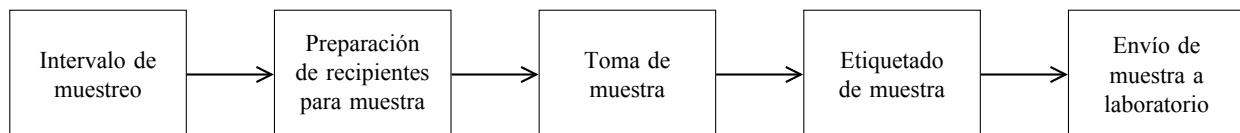


Figura 2: Procedimiento de muestreo

B. Pruebas de análisis del lubricante

Para la obtención de las propiedades del lubricante usado en el motor, se aplicó un conjunto de pruebas utilizando equipos

especializados correspondiente a un laboratorio certificado acorde a la norma ISO/IEC 17025/2017. En la Tabla 2, se especifican las pruebas de análisis empleadas.

Tabla 2: Pruebas del análisis del lubricante usado

| Tipo de prueba | Técnica | Norma de referencia |
|--|---------------------|---------------------|
| Propiedad física – Viscosidad | Viscosidad dinámica | ASTM D-445 |
| Conteo de elementos metálicos y no metálicos | Espectrometría ICP | ASTM D-5185 |
| Calidad y contaminantes del lubricante | Espectrometría IR | ASTM E-2412 |
| Contaminación de agua | Karl Fischer | ASTM D-4928 |

El conjunto de pruebas aplicadas permitió el análisis de la salud, contaminación y desgaste del motor de encendido por compresión con base a la información del lubricante empleado. Los equipos del laboratorio son calibrados en períodos anuales y verificados de forma semestral con relación a la cantidad de pruebas efectuadas con los equipos. La normativa ASTM D445-24 establece que cada muestra se mida en duplicado y se reporte el promedio, verificando en instancia inicial la determinabilidad (d); si no se cumple, se limpia y repite, luego, define la precisión con el criterio “1 en 20” y finalmente la repetibilidad (r) para resultados del mismo laboratorio/equipo y reproducibilidad (R) entre laboratorios.

C. Línea base del vehículo y lubricante

El fabricante del vehículo (OEM), recomendó el uso del lubricante bajo la especificación API CK4, SAE 15W40, corresponde a un lubricante de alto rendimiento es formulado para motores de encendido por compresión de servicio pesado, en operación bajo condiciones severas y requerimientos de emisiones ultra bajas de azufre. Además, ofrece excelente protección contra desgaste, oxidación y depósitos, asegurando una lubricación óptima en diversas condiciones operativas (23). Las propiedades del lubricante base se especifican en la Tabla 3.

Tabla 3: Especificaciones de línea base del lubricante (23)

| Propiedad | Valor |
|--------------------------------|--------|
| Viscosidad SAE | 15W-40 |
| Viscosidad [cSt@100 °C] [km/h] | 14,1 |
| Fosforo [ppm] | 1 000 |
| Azufre [ppm] | 2 400 |
| Zinc [ppm] | 1 200 |

D. Parámetros de análisis y comparación

Cada parámetro medido, expresa una condición del aceite usado, por ello, “ciertos parámetros requieren solamente límites superiores como los niveles de partículas y otros

de límites inferiores, tales como, basicidad, metales de aditivos. Otros parámetros requieren de ambos límites, como la viscosidad”(22). En la Tabla 4, son mostrados los límites de los parámetros medidos para la salud del lubricante.

Tabla 4: Criterios de límites permisibles para la salud del lubricante

| Tipo de prueba | Límite de precaución (LP) | Límite crítico (LC) |
|-------------------------------|---------------------------|-----------------------|
| Propiedad física – Viscosidad | LB + 10 % y LB – 5 % | LB + 20 % y LB – 10 % |
| Oxidación | LB + 15 | LB + 20 |
| Nitración | LB + 15 | LB + 20 |
| Sulfatación | LB + 10 | LB + 15 |

Para los elementos de metálicos y no metálicos correspondiente al desgaste y la contaminación del lubricante, se utilizó la norma ASTM D-7720 denominada Standard Guide for Statistically Evaluating Measurand Alarm Limits when Using Oil Analysis to Monitor Equipment and Oil for Fitness and Contamination para la

cuantificación de los elementos, considerando la línea base del lubricante (LB).

En la Tabla 5, se establece el criterio de cálculo de los límites permisibles para los elementos detectados acorde a la normativa indicada.

Tabla 5: Criterios de límites permisibles de los elementos detectados(24)

| Límite | Valor |
|-------------------------------------|-----------------|
| Límite de precaución superior (LPS) | LB + σ |
| Límite de precaución crítico (LPC) | LB + 3 σ |

E. Análisis de datos

Para evaluar el comportamiento de la viscosidad se calcula la viscosidad relativa(z), “que facilita la comparación del comportamiento de la viscosidad, no solo compara la desviación de la tasa de desgaste de referencia del motor, sino que también, al usar la tasa de desgaste de referencia del modelo del motor” por medio de la Ecuación 1.

$$z = \frac{\text{Viscosidad medida}}{\text{Viscosidad referencial}} \quad (1)$$

Para los criterios de límites permisibles de los elementos detectados, se establece la desviación estándar (σ) utilizado la Ecuación 2, con base a los elementos medidos en cada muestra.

Para los resultados se utilizó como software Excel.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (2)$$

3. Resultados y Discusión

A. Salud del lubricante

La viscosidad es la propiedad básica del lubricante, en este caso, los resultados de la viscosidad de las muestras tomadas, la viscosidad relativa calculada por medio de la Ecuación 1, a la vez, se establece los límites operacionales acorde a la Tabla 4: *Criterios de límites permisibles para la salud del lubricante*, se detallan los resultados obtenidos en la Tabla 6.

Tabla 6: Viscosidad medida, viscosidad relativa y límites referenciales de la viscosidad

| Muestra | Intervalo de muestra [h] | Viscosidad [cSt] | Viscosidad relativa (z) | LP Inferior [cSt] | LC Inferior [cSt] |
|---------|--------------------------|------------------|-------------------------|-------------------|-------------------|
| 1 | 250 | 12,36 | 0,87 | | |
| 2 | 250 | 12,17 | 0,86 | 13,4 | 12,69 |
| 3 | 250 | 12,20 | 0,86 | | |

Para cada muestra se evidencia una reducción de viscosidad en rango del 13 al 14 % en comparación a la viscosidad de la línea base, con una variación del 1 % entre los resultados medidos. Existe una degradación del aceite empleado en el motor de encendido por compresión por debajo del límite de

precaución y el límite crítico, lo que indica una reducción de las propiedades del aceite por los factores operacionales a bajo ralentí del motor. En la Figura 3, se muestra el comportamiento de la viscosidad relativa por muestra.

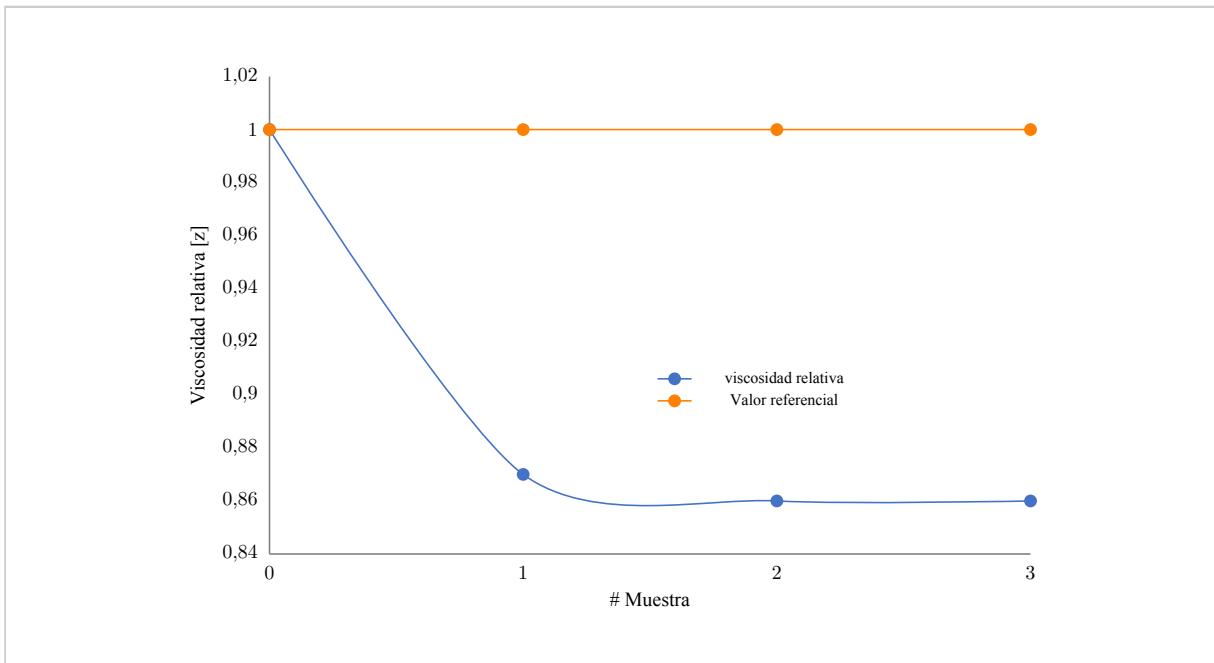


Figura 3: Comportamiento de la viscosidad relativa por muestra en el aceite SAE 15W-40

La salud del lubricante está relacionada con el comportamiento de la viscosidad, oxidación, sulfatación y nitración de la condición operativa motor degradó las propiedades físicas y químicas del aceite, por la acción de

la combustión y el combustible. La Figura 4, muestra el comportamiento de las propiedades de la salud del lubricante acorde a los resultados de las muestras cuantificadas en el laboratorio.

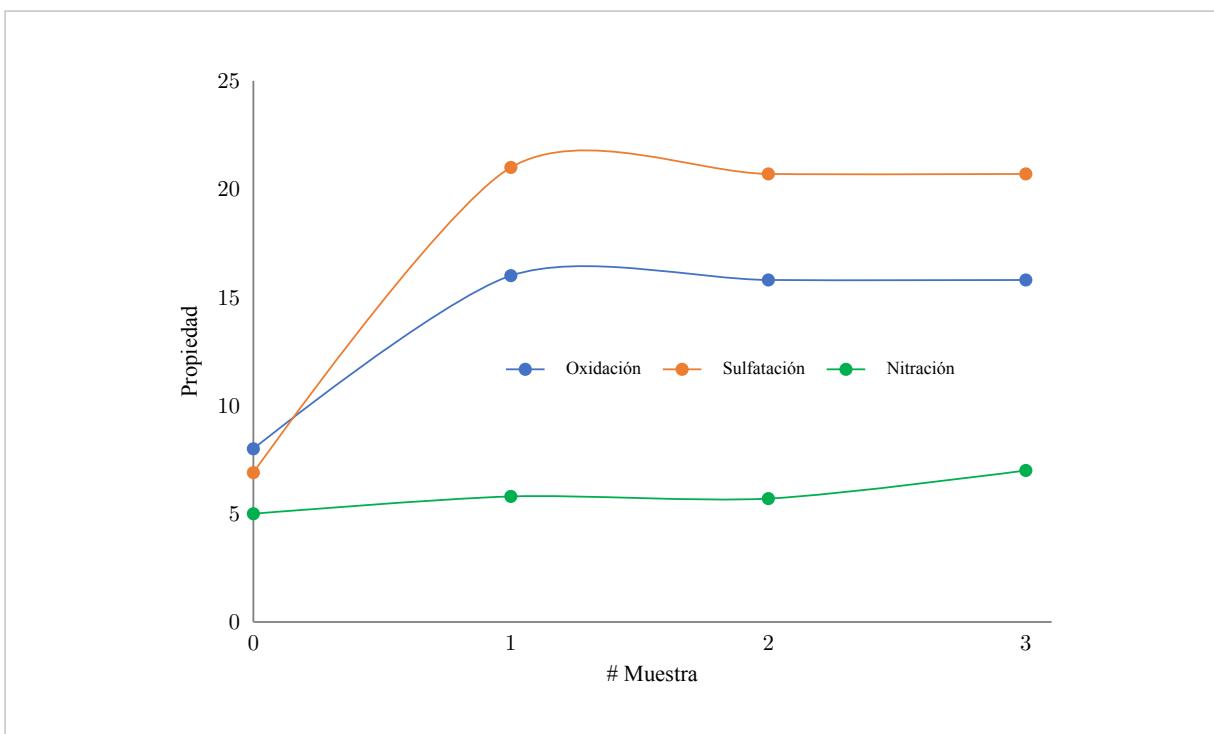


Figura 4: Comportamiento de la oxidación, sulfatación y nitración medidas en muestras del lubricante SAE 15W-40

En las tres muestras medidas, la oxidación se mantuvo estable en 16 con un incremento del 100 % en relación a la línea base, pero dentro de los límites operacionales (LP=23; LC=28), en este caso la oxidación excesiva incrementa la viscosidad y la formación de lacas. En el caso de la sulfatación mostró un valor inicialmente alto (21) y prácticamente invariable, siendo una señal de acumulación de subproductos ácidos de la combustión y del azufre, con riesgo de corrosión y depósitos al aproximarse a los límites permisibles entre 22 y 27. En la nitración se evidencia un aumento moderadamente en las tres muestras (entre 6 y 7) que se mantiene alejada de los límites (LP=20; LC=25), esto sugiere que el aceite aún no ha alcanzado condiciones críticas, aunque el uso prolongado en motores con recirculación de gases (EGR)

puede acelerar su aumento y generar formación de lodos y barnices. En conjunto, esto evidencia una reducción de la salud del lubricante sin superar los límites de funcionamiento durante el intervalo de muestreo, aunque con tendencia de acercamiento a niveles críticos que amerita un monitoreo continuo.

B. Contaminación del lubricante

La evaluación de la contaminación del lubricante se efectuó con los resultados de las muestras efectuadas acorde a la norma ASTM E-2412, en este caso, los principales contaminantes provienen del combustible, refrigerante y el aire atmosférico. Los componentes muestreados se detallan en la Tabla 7.

Tabla 7: Condiciones de contaminación del lubricante SAE 15W-40

| Componente | Muestra 1 | Muestra 2 | Muestra 3 |
|---------------|-----------|-----------|-----------|
| Silicio [ppm] | 1 | 2 | 2 |
| AGUA | NO | NO | NO |
| COMBUSTIBLE | NO | NO | NO |
| REFRIGERANTE | NO | NO | NO |
| Sodio [ppm] | 2 | 2 | 2 |

Considerando los registros de agua, combustible y refrigerante, no existe ninguna contaminación por agentes externos en la operación del motor. En el caso del aire atmosférico los niveles de silicio y sodio son insignificantes para elaborar los límites permisibles para estos elementos, por ello, tampoco existe afectación por el aire atmosférico.

C. Desgaste en el lubricante

Para los elementos metálicos y no metálicos detectados en el análisis de lubricante, se establecieron los límites operacionales con base a la desviación estándar de las mediciones efectuadas acorde a la norma ASTM D-7720. Los resultados se detallan en la Tabla 8.

Tabla 8: Niveles de partículas detectadas en el aceite SAE 15W-40 y límites permisibles

| Componente | Muestra 1 [ppm] | Muestra 2 [ppm] | Muestra 3 [ppm] | Desviación estándar [σ] | LPS | LCS |
|------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------------------------------|--------|--------|
| Metales típicos de desgaste | | | | | | |
| Hierro [Fe] | 3 | 4 | 3 | 0,7 | 2,7 | 4,1 |
| Aluminio | 0 | 1 | 1 | 0,7 | 1,7 | 3,1 |
| Cobre | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 |
| Metales blandos de desgaste | | | | | | |
| Molibdeno | 41 | 41 | 41 | 0 | ND | ND |
| Componentes de aditivos | | | | | | |
| Calcio | 1692 | 1641 | 1652 | 6.1 | 1643,9 | 1631,7 |
| Fósforo | 995 | 985 | 985 | 7.1 | 992,1 | 978,7 |
| Zinc | 1185 | 1145 | 1150 | 28.3 | 1171,7 | 1115,1 |

Acorde a los registros, las partículas de hierro son semejantes en las muestras entre tres y cuatro ppm, en el caso del aluminio se detectó una ppm y el cobre se detectó un registro constante de una ppm, estos valores indican una tendencia de desgaste no específico. En el caso de los metales blandos se

detectó la presencia de Molibdeno, utilizando como elemento anti desgaste en la formulación del aceite de motor con alta presión y temperatura de trabajo (9). Además, los resultados muestran la reducción de calcio, zinc y fósforo, elementos relacionados con los aditivos del motor, condición propia

de la operación eficiente del lubricante, estos elementos se reducen dentro de los límites permisibles.

D. Análisis de resultados

En los resultados, se evidenció la reducción de viscosidad, manteniéndose aún en rango operativo, este comportamiento es compatible con cizallamiento de mejoradores de índice de viscosidad en un aceite 15W-40 CK-4 sometido a frecuentes fases de baja carga y temperatura moderada, más que con dilución por combustible (no evidenciada por FTIR). La oxidación estable (aunque incrementada respecto a la línea base) sugiere un balance entre temperatura de aceite relativamente contenida y paquete antioxidante aún efectivo; la sulfatación alta pero estable denota presencia persistente de productos ácidos de combustión sin progresión acelerada hacia corrosión; compatible con las características del combustible diésel en el mercado ecuatoriano.

La ausencia de contaminantes (H_2O /combustible/refrigerante) y los bajos niveles de Fe, Al y Cu indican lubricación efectiva y desgaste no específico, mientras que el molibdeno responde al aditivo antidesgaste de la formulación y la disminución de Ca-P-Zn refleja consumo normal de aditivos detergentes/antidesgaste en servicio especificado. Por ello, se identifica un patrón de un ciclo térmico moderado con elevada fracción de ralentí que degrada gradualmente el lubricante sin activar mecanismos de fallo acelerado.

Los resultados coinciden con la evidencia de que el análisis de aceite habilita mantenimiento predictivo más eficiente que los intervalos fijos por tiempo/kilometraje (1, 2). La combinación de descenso de viscosidad por cizallamiento con oxidación controlada es compatible con lo descrito para flotas urbanas/servicio severo, en las que el estrés mecánico del polímero domina sobre la termoxidación cuando las temperaturas medias de aceite no son extremas [1]. A diferencia de entornos con alta carga y hollín elevado donde la interacción aditivo-hollín empeora la reología y el desgaste (7, 8), en este caso no se observó una señal de hollín crítica en la salud del lubricante ni un incremento de metales que la delate, lo que sugiere una combustión con limitada contaminación para un motor Euro 4 dentro de las condiciones operativas del vehículo. Además, la necesidad de interpretaciones ajustadas al servicio que contemplen reposiciones, consumo y envejecimiento del motor es consistente con los marcos metodológicos clásicos y actuales (2, 13, 22, 25).

Este estudio aporta evidencia aplicada para un microciclo poco documentado (transporte inter aeroportuario a gran altitud), mostrando que un programa sistemático de monitoreo de lubricante permite sostener la confiabilidad del vehículo sin sobredimensionar los cambios de aceite. Esto contribuye así a operacionalizar el CBM en flotas de vehículos, con impacto en costos, disponibilidad y cumplimiento ambiental al evitar degradaciones que eleven emisiones contaminantes y consumo de combustible. En lo teórico, el caso refuerza la pertinencia de modelos de degradación específicos por servicio y normalizaciones que discriminan efectos de operación de los de envejecimiento químico en el lubricante.

Entre las limitaciones del estudio se cuentan: (i) tamaño muestral reducido (tres mediciones, un motor), (ii) único patrón operativo y entorno ($\approx 2\ 800\ m\ s.\ n.\ m.$), (iii) ensayos acotados en resultados y (iv) la inferencia de mecanismos

(cizalla vs. dilución) sin medidas complementarias.

4. Conclusiones

Este estudio evidencia que el aceite SAE 15W-40 correspondiente al bus inter aeroportuario conservó su salud, limpieza y una baja tasa de desgaste durante 750 horas de trabajo bajo un ciclo severo de baja velocidad y alto ralentí, lo cual viabiliza el mantenimiento basado en condición en este contexto, estos resultados tienen implicaciones directas para la optimización de intervalos de servicio y la búsqueda de modelos predictivos que integren datos tribológicos, operacionales y de emisiones para mejorar la gestión y operación de la flota vehicular.

La salud del lubricante evidencia una reducción progresiva en la viscosidad no mayor al 14 % y variaciones en las propiedades químicas (oxidación, sulfatación y nitración), cuyos valores se mantienen dentro de los límites permisibles. Esto indica que el aceite conserva su capacidad de protección hasta las 750 horas de operación, permitiendo establecer intervalos de cambio más eficientes en función de la condición real del lubricante.

La contaminación del lubricante no presentó niveles de agua, combustible, refrigerante ni ingreso de polvo atmosférico, lo cual demuestra un adecuado sellado del sistema y la eficiencia de los filtros de aire y aceite. En consecuencia, la degradación observada en el aceite está relacionada principalmente con las condiciones de combustión y no con contaminantes externos.

El desgaste metálico detectado (hierro, aluminio y cobre) fue inferior a 4 ppm en las muestras analizadas lo que no define un tipo de desgaste en el motor, mientras que la reducción progresiva de los aditivos (calcio, fósforo y zinc) se mantuvo dentro de los límites permisibles confirmando que el motor opera en condiciones controladas y que el lubricante cumple eficazmente su función de protección antidesgaste en el periodo estudiado.

Futuras investigaciones deberían ampliar la cohorte, incorporar trazabilidad operacional (carga, temperatura de aceite, porcentaje de ralentí, EGR activo), y añadir métricas TAN/TBN y hollín, así como la verificación interlaboratorio para robustecer la incertidumbre metrológica.

Financiamiento:

Los autores expresan autofinanciamiento para realizar esta obra de investigación.

Conflictos de intereses:

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Contribución de autor/es:

Jaime Fernando Antamba 30%: Escritura, recursos e investigación

Pablo André Vacacela, 30%: Escritura, recursos e investigación

Ángel Orlando Lluilema, 13.33 %: Escritura, gestión e investigación

Luis Fabricio Corrales, 13.33 %: Recursos e investigación

5. Referencias

1. RAPOSO, Hugo; FARINHA, José Torres; FONSECA, Inácio y GALAR, Diego. Predicting condition based on oil analysis – A case study. *Tribology International*. 2019, vol. 135, págs. 65-74. Disp. desde DOI: 10 . 1016 / j . triboint . 2019 . 01 . 041.
2. WAKIRU, James M.; PINTELON, Liliane; MUCHIRI, Peter N. y CHEMWENO, Peter K. A review on lubricant condition monitoring information analysis for maintenance decision support. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2019, vol. 118, págs. 108-132. Disp. desde DOI: 10 . 1016 / j . ymssp . 2018 . 08 . 039.
3. ISLAM SAZZAD, Md Rahatul; RAHMAN, Md Mizanur; HASSAN, Tafsimul; AL RIFAT, Abdullah; AL MAMUN, Abdullah; ADIB, Abidur Rahman; MERAZ, Redoy Masum y AHMED, Minhaz. Advancing sustainable lubricating oil management: Re-refining techniques, market insights, innovative enhancements, and conversion to fuel. *Heliyon*. 2024, vol. 10, n.º 20, e39248. Disp. desde DOI: 10 . 1016 / J . HELIYON . 2024 . E39248.
4. HASANNUDDIN, A. K.; WIRA, J. Y.; SARAH, S.; WAN SYAIDATUL AQMA, W. M. N.; ABDUL HADI, A. R.; HIROFUMI, N.; AIZAM, S. A.; AIMAN, M. A. B.; WATANABE, S.; AHMAD, M. I. y AZRIN, M. A. Performance, emissions and lubricant oil analysis of diesel engine running on emulsion fuel. *Energy Conversion and Management*. 2016, vol. 117, págs. 548-557. Disp. desde DOI: 10 . 1016 / J . ENCONMAN . 2016 . 03 . 057.
5. VYAVHARE, Kimaya; BAGI, Sujay; PATEL, Mihir y ASWATH, Pranesh B. Impact of Diesel Engine Oil Additives-Soot Interactions on Physicochemical, Oxidation, and Wear Characteristics of Soot. *Energy and Fuels*. 2019, vol. 33, n.º 5, págs. 4515-4530. Disp. desde DOI: 10 . 1021 / ACS . ENERGYFUELS . 8B03841.
6. KONTOU, A.; SOUTHBY, M.; MORGAN, N. y SPIKES, H. A. Influence of Dispersant and ZDDP on Soot Wear. *Tribology Letters*. 2018, vol. 66, n.º 4. Disp. desde DOI: 10 . 1007 / S11249-018-1115-X.
7. KIRKBY, Thomas; SMITH, Joshua J.; BERRYMAN, Jacqueline; FOWELL, Mark y REDDYHOFF, Tom. Soot wear mechanisms in heavy-duty diesel engine contacts. *Wear*. 2023, vol. 524-525. Disp. desde DOI: 10 . 1016 / j . wear . 2023 . 204733.
8. RAPOSO, Hugo; FARINHA, José Torres; FONSECA, Inácio y FERREIRA, L. Andrade. Condition monitoring with prediction based on diesel engine oil analysis: A case study for urban buses. *Actuators*. 2019, vol. 8, n.º 1. Disp. desde DOI: 10 . 3390 / act8010014.
9. FERN'ANDEZ-FEAL, M. C.; FERN'ANDEZ-FEAL, M. L.; S'ANCHEZ-FERN'ANDEZ, L. R. y P'EREZ-PRADO, J. R. Study of Metal Concentration in Lubricating Oil with Predictive Purposes. *Current Journal of Applied Science and Technology*. 2018, vol. 27, n.º 6, págs. 1-12. Disp. desde DOI: 10 . 9734 / CJAST / 2018 / 41472.
10. OMIYA, Takeru; HANYUDA, Kiyoshi y NAGATOMI, Eiji. Predicting engine oil degradation across diverse vehicles and identifying key factors. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2025, vol. 229, pág. 112524. Disp. desde DOI: 10 . 1016 / J . YMSSP . 2025 . 112524.
11. CAO, Wei; DONG, Guangneng; XIE, You Bai y PENG, Zhongxiao. Prediction of wear trend of engines via on-line wear debris monitoring. *Tribology International*. 2018, vol. 120, págs. 510-519. Disp. desde DOI: 10 . 1016 / j . triboint . 2018 . 01 . 015.
12. MACI'AN, V.; TORMOS, B.; OLMEDA, P. y MONTORO, L. Analytical approach to wear rate determination for internal combustion engine condition monitoring based on oil analysis. *Tribology International*. 2003, vol. 36, n.º 10, págs. 771-776. Disp. desde DOI: 10 . 1016 / S0301-679X(03)00060-4.
13. VALIŠ, David; Ž'AK, Libor; POKORA, Ondřej y L'ANSK'Y, Petr. Perspective analysis outcomes of selected tribodiagnostic data used as input for condition based maintenance. *Reliability Engineering and System Safety*. 2016, vol. 145, págs. 231-242. Disp. desde DOI: 10 . 1016 / j . ress . 2015 . 07 . 026.
14. ASTM INTERNATIONAL. *Standard Test Method for Kinematic Viscosity of Transparent and Opaque Liquids and Calculation of Dynamic Viscosity (ASTM D445-24)*. 2024. Online; accessed 25 September 2025.
15. KIRKBY, Thomas; PACINO, Andrea; SMITH, Joshua J.; FOWELL, Mark; BERRYMAN, Jacqueline; FRENNFELT, Claes; LA ROCCA, Antonino y REDDYHOFF, Tom. Correlating wear with the lubricant properties of heavy-duty diesel engine oils. *Tribology International*. 2024, vol. 199, pág. 110018. Disp. desde DOI: 10 . 1016 / J . TRIBPOINT . 2024 . 110018.
16. WEI, Lei; DUAN, Haitao; JIA, Dan; JIN, Yongliang; CHEN, Song; LIU, Lian; LIU,

- Jianfang; SUN, Xianming y LI, Jian. Motor oil condition evaluation based on on-board diagnostic system. *Friction*. 2020, vol. 8, n.º 1, págs. 95-106. Disp. desde DOI: 10 . 1007 / S40544-018-0248-0.
17. SEJKOROV'A, Marie; HURTOV'A, Ivana; JILEK, Petr; NOV'AK, Martin y VOLTR, Ondřej. Study of the effect of physicochemical degradation and contamination of motor oils on their lubricity. *Coatings*. 2021, vol. 11, n.º 1. Disp. desde DOI: 10 . 3390 / COATINGS11010060.
18. FURCH, Jan y JEL'INEK, Josef. Design of a tribotechnical diagnostics model for determining the technical condition of an internal combustion engine during its life cycle. *Eksplotacija i Niegawodnosc*. 2022, vol. 24, n.º 3, págs. 437-445. Disp. desde DOI: 10 . 17531 / EIN . 2022 . 3 . 5.
19. TORMOS MART'INEZ, Bernardo; PLA, Benjam'in; S'ANCHEZ-M'ARQUEZ, Ram'on y CARBALLO, Jose Luis. Explainable AI Using On-Board Diagnostics Data for Urban Buses Maintenance Management: A Study Case. *Information*. 2025, vol. 16, n.º 2, págs. 74. Disp. desde DOI: 10 . 3390 / INFO16020074.
20. SEJKOROV'A, Marie; KUČERA, Mari'an; HURTOV'A, Ivana y VOLTR, Ondřej. Application of FTIR-ATR spectrometry in conjunction with multivariate regression methods for viscosity prediction of worn-out motor oils.
21. ANTAMBA GUASGUA, Jaime Fernando; REMACHE CHIMBO, Álvaro; VALLEJO, Vanessa y CORRALES, Fabricio. Salud del lubricante y comportamiento de los aditivos en vehículos tipo turismo. *Revista Científica y Tecnológica UPSE*. 2021, vol. 8, n.º 2, págs. 33-39. Disp. desde DOI: 10 . 26423 / RCTU . V8I2 . 620.
22. TORMOS MART'INEZ, Bernardo. *Diagn'ostico de motores di'esel mediante el an'alysis del aceite usado*. Reverte, 2013. ISBN 8429147020. Disponible en: https://books.google.com/books/about/Diagn%C3%B3stico_de_motores_diesel.html.
23. IASA. *CAT DEO-ULS*. 2025. Disponible en: <https://iasaglobal.com/wp-content/fichas-tecnicas/CAT-DEO-ULS-15W-40-CK-4.pdf>. Online; accessed 25 September 2025.
24. ASTM INTERNATIONAL. *Guide for Statistically Evaluating Measurand Alarm Limits when Using Oil Analysis to Monitor Equipment and Oil for Fitness and Contamination*. 2021. Online; accessed 25 September 2025.
25. MACI'AN, Vicente; TORMOS, Bernardo; RUIZ, Santiago y MIR'O, Guillermo. Low viscosity engine oils: Study of wear effects and oil key parameters in a heavy duty engine fleet test. *Tribology International*. 2016, vol. 94, págs. 240-248. Disp. desde DOI: 10 . 1016 / J . TRIBPOINT . 2015 . 08 . 028.



Artículo de libre acceso bajo los términos de una **Licencia Creative Commons Reconocimiento – NoComercial – CompartirIgual 4.0 Internacional**. Se permite que otros remezclen, adapten y construyan a partir de su obra sin fines comerciales, siempre y cuando se otorgue la oportuna autoría y además licencien sus nuevas creaciones bajo los mismos términos.