



**UNIVERSIDAD  
DE ANTIOQUIA**

**ANÁLISIS TRIBOLÓGICO EN MOTORES ISUZU  
4JJ1 DE LA EMPRESA COORDINADORA  
MERCANTIL S.A.**

**Autor:  
Juan Daniel Cañaveral Barrientos**

**Universidad de Antioquia  
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Mecánica  
Medellín, Colombia  
2021**



**Análisis tribológico en motores Isuzu 4JJ1 de la empresa Coordinadora  
Mercantil S.A.**



**UNIVERSIDAD  
DE ANTIOQUIA**  
1 8 0 3

**Juan Daniel Cañaverl Barrientos**

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para  
optar al título de: **ingeniero mecánico**

Asesores:

Asesor interno:

Iván Darío Bedoya Caro

Profesor

Asesor externo:

David Alejandro Tangarife Zapata

Ingeniero mecánico

Línea de investigación:

Mantenimiento

Universidad de Antioquia  
Facultad de Ingeniería, Departamento de  
Ingeniería Mecánica. Medellín, Colombia 2021

## Contenido

Análisis tribológico mediante correlación motores Isuzu 4JJ1 de la empresa Coordinadora Mercantil S.A. ....	8
Resumen .....	8
Introducción.....	9
Objetivos.....	11
Objetivo general.....	11
Objetivos específicos .....	11
Marco Teórico.....	12
Lubricante.....	12
Lubricación.....	13
Pistón-anillos-camisa .....	14
Casquetes.....	14
Engranajes de distribución.....	15
Metodologías para medir el cambio de las propiedades.....	15
Técnicas para la determinación de la degradación del aceite.....	15
Viscosidad.....	15
Punto de inflamación .....	16
TBN .....	18
Técnicas para la cuantificación de la contaminación presente en el aceite .....	18
Dilución de combustible .....	18
Contaminación por agua.....	18
Oxidación-Nitración.....	18
Técnicas para la identificación y cuantificación de partículas de desgaste .....	19
Espectrometría.....	19
Ferrografía .....	19
Recuento de partículas.....	20
Microscopía.....	20
Colectores magnéticos.....	20
Particulas quantifier index (PQI) .....	20
Análisis de propiedades .....	20
Propiedades físicas.....	21
Viscosidad.....	21
Total base number (TBN) .....	22
Total acid number (TAN) .....	23
Punto de inflamación .....	23
Condiciones del aceite.....	23
Oxidación, Nitración y Sulfatación .....	23
Aditivos .....	24
Contaminantes .....	24
Agua.....	24
Combustible .....	25
Hollín .....	25
Silicio .....	26
Sodio.....	27

Componentes de desgaste.....	27
Estrategias de lubricación.....	28
Recomendaciones para toma de decisiones .....	29
Metodología .....	30
Resultados y análisis.....	34
Comparativa métodos de muestreo .....	34
Correlaciones.....	38
Correlación entre el análisis de aceite y el material particulado en los gases de escape .....	49
Emisiones de partículas de hidrocarburos.....	49
Emisiones de partículas por contenido de cenizas .....	50
Emisiones de partículas por contenido sulfato .....	50
Conclusiones.....	53
Referencias.....	54



## Tabla de gráficas

Gráfica 1. Tipos de lubricación.....	13
Gráfica 2. Viscosímetro de Ubbelohde .....	15
Gráfica 3. Viscosímetro de Saybolt .....	16
Gráfica 4. Cleveland open cup .....	17
Gráfica 5. Pensky-Martens close cup .....	17
Gráfica 6. Esquema circuito de lubricación a presión .....	21
Gráfica 7. Esquema sistema de lubricación motores Isuzu 4JJ1 .....	30
Gráfica 8. Inspección nivel de aceite .....	30
Gráfica 9. Diagrama de flujo toma de muestras y análisis .....	31
Gráfica 10. Aceite drenado desde el cárter.....	33
Gráfica 11. Aceite drenado desde una bomba de vacío.....	33
Gráfica 12. Referencia Viscosidad vs Nitración.....	38
Gráfica 13. Viscosidad vs Nitración-móvil 2448.....	38
Gráfica 14. Viscosidad vs Nitración-móvil 2397.....	39
Gráfica 15. Referencia Viscosidad vs Oxidación .....	39
Gráfica 16. Viscosidad vs Oxidación-móvil 2448 .....	40
Gráfica 17. Viscosidad vs Oxidación-móvil 2397 .....	40
Gráfica 18. Referencia Oxidación vs Nitración.....	41
Gráfica 19. Nitración vs Oxidación-móvil 2448 .....	42
Gráfica 20. Nitración vs Oxidación-móvil 2397 .....	42
Gráfica 21. Referencia Hollín vs Viscosidad.....	43
Gráfica 22. Viscosidad vs Hollín-móvil 2448 .....	43
Gráfica 23. Viscosidad vs Hollín-móvil 2397 .....	44
Gráfica 24. Referencia Fuel vs Viscosidad.....	44
Gráfica 25. Viscosidad vs Fuel-móvil 2397.....	44
Gráfica 26. Referencia Silicio vs Hierro.....	45
Gráfica 27. Silicio vs Hierro-móvil 2448 .....	45
Gráfica 28. Silicio vs Hierro-móvil 2397 .....	46
Gráfica 29. Referencia Hollín vs Hierro.....	46
Gráfica 30. Hollín vs Hierro-móvil 2448.....	47
Gráfica 31. Hollín vs Hierro-móvil 2397.....	47
Gráfica 32. Silicio vs Hollín vs Hierro-móvil 2448 .....	48
Gráfica 33. Hierro vs Sodio.....	48
Gráfica 34. Composición material Particulado .....	49

## Índice de tablas

Tabla 1. Efectos característicos sobre la viscosidad .....	22
Tabla 2. Efectos asociados a la presencia de agua en el aceite lubricante..	25
Tabla 3. Valores de referencia para elementos de desgaste .....	27
Tabla 4. Acciones recomendadas.....	29
Tabla 5. Criterios de clasificación de la información .....	33
Tabla 6. Parámetros de muestreo .....	34
Tabla 7. Valores de referencia .....	35
Tabla 8. Resultados obtenidos móvil 2397- aceite drenado desde el cárter ..	35
Tabla 9. Resultados obtenidos móvil 2397-Aceite drenado desde bomba de vacío .....	35
Tabla 10. Resultados obtenidos móvil 2448-Aceite drenado desde el cárter .	36
Tabla 11. Resultados obtenidos móvil 2448-Aceite drenado desde bomba de vacío .....	36
Tabla 12. Technical data sheet Shell Rimula R4 X 15W-40 .....	36
Tabla 13. Valores atípicos aditivos-móvil 2397.....	41
Tabla 1. Resultados obtenidos primer algoritmo.....	51
Tabla 14. Resultados obtenidos primer algoritmo.....	52

## Anexos

Anexo 1. FURGON CHEVROLET NKR IIIE TRH121-Bomba de vacío.....	55
Anexo 2. FURGON CHEVROLET NKR IIIE TRH121-Muestra drenada.....	55
Anexo 3. FURGÓN CHEVROLET NKR IIIE TRN 216-Bomba de vacío.....	55
Anexo 4. FURGON CHEVROLET NKR IIIE TRN 216-Muestra drenada.....	55



## **Análisis tribológico en motores Isuzu 4JJ1 de la empresa Coordinadora Mercantil S.A.**

---

### **Resumen**

En el presente trabajo se implementó una metodología de recolección de muestras de aceite y análisis de resultados en los motores Isuzu 4JJ1, Se realizó una revisión sistemática de literatura para determinar modelos que permitan relacionar la emisión de material particulado en los gases de escape con variables tribológicas determinadas a partir del consumo de aceite, todo esto se desarrolló con el fin de mejorar la toma de decisiones en el área de mantenimiento de la compañía Coordinadora mercantil S.A.S.

Inicialmente la recolección de muestras se efectuaba drenando el aceite desde el cárter, lo cual generaba resultados imprecisos. En el análisis de resultados se presentaban vacíos en correlaciones de los diferentes elementos del análisis de aceite.

Se analizó la recolección de muestras y se observó que al drenar el aceite lubricante desde una bomba de vacío da resultados más precisos, los cuales permiten tomar decisiones con mayor certeza. En el tema de análisis de resultados se establecieron nuevas correlaciones que permiten determinar posibles causales de falles del motor, y por último se sugirió un modelo que correlaciona el análisis de aceite con el material particulado, esto último con el fin de generar menos emisiones contaminantes, a su vez ser exentos de pico y placa ambiental.

## Introducción

Coordinadora mercantil S.A.S. es una empresa dedicada al sector logístico, creada el 10 de febrero de 1967, cuando su fundador Aníbal Obando identificó la necesidad de crear una red logística que permitiera a las diferentes empresas mover sus inventarios de ciudad, posibilitando que estos llegaran a las diferentes ciudades del territorio nacional en un menor tiempo. Actualmente, la empresa es líder a nivel nacional, contando con sedes en las principales ciudades del país (Bogotá, Cali, Barranquilla y Medellín), dentro de su portafolio cuenta con: mensajería, paquetero, cargas masivas, envíos internacionales y transporte de químicos.

El sector transporte presenta el mayor consumo energético consumiendo aproximadamente 41% (Botero, 2016) de la energía final producida en el país, también presenta pérdidas cercanas al 82% debido a la ineficiencia de los equipos y tecnologías actuales del país, además es el sector con mayor producción de CO<sub>2</sub> y otros contaminantes. Como principal fuente de energía se utilizan los combustibles fósiles; ACPM y gasolina. El mayor consumo de ACPM se da en el transporte público y de cargas (buses, tractocamiones y furgones), debido al aumento del parque automotor del país se ha visto afectado la calidad del aire producto de las emisiones contaminantes.

El departamento de mantenimiento de Coordinadora mercantil S.A.S. es el encargado de proveer y garantizar el buen funcionamiento de la flota de vehículos, puesto que es el activo fijo más importante para la compañía. Desde el área de mantenimiento se vela tanto por la flota local; motocicletas, motocarro, van, camiones y furgones, como por los vehículos de ruta nacional; tractocamiones. El buen funcionamiento de estos se logra gracias a que la compañía cuenta con mano de obra especializada en los diferentes sectores, tales como latonería y pintura, mecánica, eléctrica, cerrajería, montallantas y lubricación. Mediante el uso de técnicas preventivas, correctivas y predictivas (análisis de aceite) se logra una buena confiabilidad en la flota.

El análisis de aceite es una herramienta de monitoreo del vehículo, la cual sirve como instrumento de diagnóstico, reduciendo mantenimientos innecesarios y reconociendo fallas potenciales, mejorando así el análisis causa raíz. La muestra se toma en cada cambio de aceite de un vehículo, 25000 km y 8000 km para ruta nacional y ruta local respectivamente. La prueba de laboratorio da como resultado valores de: emisión atómica (Fe, Cr, Pb, Zn, Ca, etc.), viscosidad, análisis de infrarrojo (hollín, oxidación, etc.); de acuerdo a los diferentes valores obtenidos, se tienen límites condenatorios que permiten saber cuándo un compuesto se encuentra por fuera de su estado normal, según sea el compuesto se sabe de dónde proviene, ejemplo de esto es el Hierro (Fe), que como posible fuente son: cigüeñal, engranajes,

válvulas, o como Silicio (Si) el cual como posible fuente son: polvo, antiespumante. Por ende, se busca establecer mediante el análisis de aceite correlaciones entre los diferentes compuestos, que permitan predecir el material particulado expulsado por los gases de escape, además de establecer estrategias de lubricación.

Durante el trabajo realizado para la compañía Coordinadora mercantil S.A.S, se encontró que la mayor limitante es el tiempo para realizar los estudios, debido a las diferentes actividades que se presentan en el día a día. Con la definición del contexto operacional en el tema de toma de muestras, fue posible establecer una revisión del material bibliográfico con el fin recolectar información necesaria para establecer mejoras en el proceso, además se entrevistó un experto en el tema de toma de muestras y análisis de aceite, el trabajo realizado tuvo un alcance teórico en la parte de correlacionar el análisis de aceite con el material particulado en los gases de escape y de implementación de mejores en el tema de tomas de muestra y correlación de resultados.



## **Objetivos**

### **Objetivo general**

Establecer estrategias y parámetros de lubricación que permiten realizar tomas acertadas de decisiones frente a la intervención en los motores, en base a los resultados obtenidos de las muestras.

### **Objetivos específicos**

- Encontrar modelos que permitan correlacionar el material particulado (pm), con los parámetros obtenidos en las muestras de aceite de los motores Isuzu 4JJ1.
- Implementar procedimientos que permitan aumentar la confiabilidad en la toma de muestras de aceite.
- Analizar las múltiples variables obtenidas del análisis de aceite y establecer correlaciones entre ellas, que permitan el aumento de la confiabilidad en la toma de decisiones.



## Marco Teórico

El aceite lubricante dentro de un motor de combustión interna juega un papel crucial, cumpliendo funciones como; disminución de rozamiento, refrigeración de los componentes, favoreciendo la estanqueidad dejando impregnando los componentes del motor, también cumple el transporte de partículas suspendidas hasta el sistema de filtración y protege contra la corrosión (Calleja, 2008). Los diferentes procesos a los que se expone el aceite lubricante, llevan a que este experimente pérdidas paulatinas en las capacidades para desarrollar sus funciones, lo que se conoce como degradación de sus propiedades físico-químicas (Martinez, 2005).

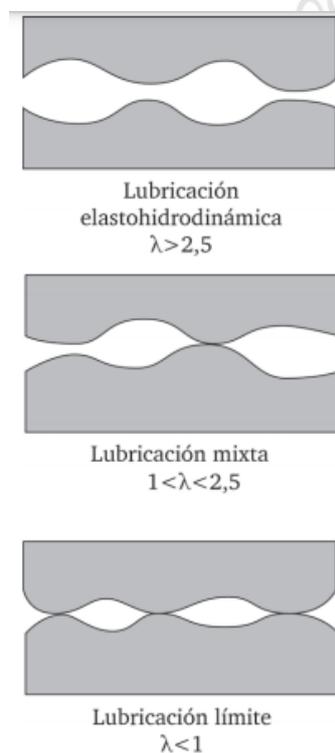
## Lubricante

El lubricante es aquella sustancia que se interpone entre las superficies reduciendo la fricción, reemplazando la fricción adhesiva por la fricción viscosa, los lubricantes se pueden presentar en diferentes estados: sólidos (disulfuro de molibdeno), semisólidos (grasa) y líquidos (aceite). Los lubricantes líquidos están compuestos de una base, que puede ser aceite mineral o sintético, adicional a la base está compuesto por aditivos, que permiten mejorar las propiedades (antioxidantes, índice de viscosidad, detergentes, etc.) (Waldyr Fong Silva) es en este punto donde se presenta la diferencia entre un lubricante para un motor diésel y para uno a gasolina, los motores diésel utilizan viscosidades más altas, diferentes niveles de aditivos como por ejemplo niveles de detergentes mayores. Las principales características de un aceite lubricante para motores diésel son (CIMAC, 2011):

- Viscosidad: esta se determina midiendo el tiempo que demora el aceite lubricante en fluir a través de un capilar, se da en centistokes cSt, esta prueba se realiza a 40 °C y 100 °C según lo define el sistema de clasificación industrial SAE J300.
- Número base (TBN): permite conocer la alcalinidad del aceite lubricante, se define como la cantidad necesaria de ácido clorhídrico necesaria para neutralizar un gramo de aceite, se da en mg KOH/g, muestra el potencial del aceite lubricante para neutralizar los ácidos producto de la combustión y otros componentes.
- Contenido de agua: este porcentaje se mide a través de una titulación de Karl-Fischer o por espectroscopia de infrarrojos, el agua es un contaminante que provoca emulsiones.
- Punto de inflamación: es la temperatura mínima a la cual una chispa puede encender el vapor del aceite lubricante.

## Lubricación

La lubricación tiene por finalidad la reducción de fricción entre las superficies con movimiento relativo y que se encuentran en contacto, reduciendo el desgaste, la lubricación dentro de un motor de combustión interna puede ser de dos formas: estática cuando el lubricante no se desplaza como ocurre en las grasas, dinámica cuando el lubricante desarrolla movimiento; dentro de la lubricación dinámica se encuentran: por barboteo en la cual el lubricante forma una nube de partículas y a presión en este se suministra el aceite a través de conductos. Combinando el movimiento relativo entre las superficies en contacto con el lubricante se obtienen diferentes tipos de lubricación según la velocidad de desplazamiento: lubricación límite, mixta e hidrodinámica, en la *gráfica 1* se representa estas situaciones (Mingo, Julio 2016), en el presente trabajo solo se hará énfasis en la lubricación límite, esta se da cuando la película lubricante no es capaz de cubrir la rugosidad de las superficies y por lo tanto las asperezas son las encargadas de soportar las cargas, se presenta rozamiento metal con metal, el coeficiente de fricción es comparable con el contacto entre superficies secas, por ende su obtención es posible con resultados experimentales o métodos analíticos.



**Gráfica 1. Tipos de lubricación.**

La pérdida de la película lubricante o su ruptura generan que la lubricación deje ser hidrodinámica para convertirse en límite, dando presencia a rozamientos metal con metal, a continuación, se presentan algunos grupos críticos donde se puede generar este fenómeno.

### **Pistón-anillos-camisa**

Este grupo es el núcleo fundamental del motor debido a que está sometido a condiciones de funcionamiento y de entornos severas: velocidades, presiones, temperaturas, ambiente corrosivo y presencia de abrasivos. Con el movimiento de los pistones dentro de la camisa, se forma entre los anillos y la camisa una película hidrodinámica que protege los componentes del desgaste, el espesor de esta película presenta valores mínimos en las cercanías de punto muerto superior (PMS) (Martinez, 2005). Con el fin de reducir la pérdida de la película hidrodinámica se buscan estrategias como: buscar un lubricante con un valor de alto de viscosidad debido a que este favorece la permanencia de la película lubricante, que el aceite lubricante presente un bajo índice de volatilidad, por último, se busca un aceite capaz de neutralizar la acidez de los productos de la combustión (TBN), con el fin de prevenir la formación de SO<sub>2</sub> el cual contribuye al desgaste del grupo.

### **Casquetes**

Los casquetes se utilizan con la finalidad de proteger los árboles, se utilizan como piezas de desgaste, como deben transmitir elevadas cargas es necesario que entre ellos permanezca una película hidrodinámica, esta película tiene como particularidad un espesor variable debido a que el casquete sufre desgaste (Martinez, 2005). Una de las estrategias más comunes para preservar la vida útil de los casquetes es al igual que para el grupo pistón-anillos-camisa la viscosidad, pero en este caso el aceite lubricante debe mantener esta propiedad a altas temperaturas, la viscosidad presenta un comportamiento inversamente proporcional a la temperatura, otra estrategia que aumenta la vida útil de los casquetes frente al desgaste, es un buen paquete de aditivos que permita la eliminación de impurezas.

## Engranajes de distribución

A medida que los dientes engranan y desengranan se presenta un ciclo de contacto que varía entre deslizamiento y rodadura, los engranajes transmiten cargas moderadas dentro del motor. Como principal estrategia de lubricación en los engranajes se establece un abundante caudal de aceite (Martinez, 2005).

## Metodologías para medir el cambio de las propiedades

dentro del análisis de aceite existen diferentes métodos y técnicas empleados para establecer las condiciones del lubricante, las técnicas de análisis de aceite se pueden clasificar en:

- Técnicas para la determinación de la degradación del aceite
- Técnicas para la cuantificación de la contaminación presente en el aceite
- Técnicas para la identificación y cuantificación de partículas de desgaste.

## Técnicas para la determinación de la degradación del aceite

### Viscosidad

La viscosidad cinemática se establece mediante distintos métodos, empleando distintos ensayos (Martinez, 2005):

- Estableciendo el tiempo de circulación del aceite a través de un capilar, para este tipo se ensayó se utiliza el viscosímetro de Ubbelohde *gráfica 2*.



**Gráfica 2. Viscosímetro de Ubbelohde.** Fuente: tomada de internet.

- Estableciendo el tiempo de vaciado de un recipiente de volumen conocido fijo, el cual tiene un agujero de diámetro conocido, para este tipo de procedimiento se utiliza un viscosímetro de Saybolt *gráfica 3*.



**Gráfica 3. Viscosímetro de Saybolt.** Fuente: tomada de internet.

### **Punto de inflamación**

Para la determinación del punto de inflamación de un aceite, se emplean los siguientes métodos (Martínez, 2005)

- Cleveland open cup *gráfica 4* el cual está basado en la norma ASTM D-92, este método consiste en colocar la muestra en un crisol metálico abierto y calentarlo, periódicamente se le pasa un mechero, se considera que el aceite alcanza el punto de inflamación cuando este es capaz de mantener la llama.



**Gráfica 4. Cleveland open cup.** Fuente: tomada de internet.

- Pensky-Martens *gráfica 5* este método está basado en la norma ASTM D-93, en este método el recipiente es cerrado y los vapores se encierran, el crisol se calienta y periódicamente se le pasa un mechero. Al recogerse los vapores del aceite en un recipiente cerrado los puntos de inflamación menores que en caso del método open cup.



**Gráfica 5. Pensky-Martens close cup.** Fuente: tomada de internet.

## **TBN**

Actualmente para establecer el grado de acidez o alcalinidad de un aceite se utilizan métodos descritos bajo las normas ASTM D-2896 y D-4739. El método basado en la norma ASTM D-2896 permite la medición de bases medias y fuertes presentes en el aceite muy útil en aceite nuevos. El método basado en la norma ASTM D-4739 es un método que al igual que el anterior mide bases medias y fuertes, la diferencia radica en que emplea un método de adición de reactivo lento lo que lo hace apropiado para aceite usados (Martinez, 2005).

## **Técnicas para la cuantificación de la contaminación presente en el aceite**

### **Dilución de combustible**

Para la determinación de la presencia de combustible se realiza mediante una espectrometría infrarroja, esta se debe realización con una frecuencia de 875  $\text{cm}^{-1}$ . Otra forma de establecer la dilución de combustible es con la viscosidad obtenida directamente de gráficas (Martinez, 2005).

### **Contaminación por agua**

El contenido de agua suspendida en el aceite se puede determinar según la norma ASTM D-95, la cual consiste en destilar y condensar una mezcla de aceite con un solvente, estos se recogen en una trampa calibrada. Para casos en los que la presencia de agua es muy pequeña se utiliza el método de valoración de aceite en el cual se emplea el reactivo Karl Fisher, como lo establece la norma ASTM D-1744 (Martinez, 2005).

### **Oxidación-Nitración**

La nitroxidación en el aceite se establece mediante el método de espectrometría infrarroja, para el caso particular de la oxidación se usan frecuencias entre 1700-1750  $\text{cm}^{-1}$ , para la nitración se usa una frecuencia de 1630  $\text{cm}^{-1}$  (Martinez, 2005).

## **Técnicas para la identificación y cuantificación de partículas de desgaste**

Existen varios métodos empleados para conocer el desgaste de un motor diésel, dentro de los cuales están:

- Espectrometría
- Ferrografía
- Recuento de partículas
- Colectores magnéticos
- Microscopía
- PQI

### **Espectrometría**

Esta técnica se basa en la interacción entre la radiación electromagnética y la materia, conociendo que los átomos de cualquier elemento cuando son excitados producen espectros electromagnéticos únicos, con los cuales va ser posible identificarlos. Los espectros de emisión se dan intensidad de emisión frente a la longitud de onda (Martinez, 2005). La radiación emitida interacciona con los átomos del elemento presente y estos experimentan emisión, absorción o fluorescencia, debido a estas interacciones los espectros se clasifican en:

- Espectrómetros de emisión atómica (EEA)
- Espectrómetros de absorción atómica (EAA)
- Espectrómetros de fluorescencia de rayos X (XRF)

### **Ferrografía**

La ferrografía es una técnica que separa magnéticamente las partículas, por esta razón su limitante es materiales ferromagnéticos, teniendo como excepción los siguientes metales: aluminio y bronce, que al desgastarse con materiales ferromagnéticos adquieren trazas de ellos, adquiriendo un comportamiento ligeramente magnético. La ferrografía se clasifica en dos técnicas: la ferrografía analítica que permite conocer la composición y forma de las partículas, y la ferrografía de lectura directa que determina la concentración de los elementos.

## **Recuento de partículas**

El recuento de partículas es una técnica que proporciona la distribución de tamaños de las partículas suspendidas en la muestra, su mayor limitante es que no suministra información de los elementos presente en la muestra. Esta técnica se basa en la norma ISO 4406, la cual clasifica las partículas por tamaños. Para este ensayo hay dos técnicas: la dispersión de luz láser y oscurecimiento de luz.

## **Microscopía**

Esta técnica es complementaria al resto de las técnicas, ya que permite la inspección de las partículas previamente detectadas. El tipo de microscopia utilizado será influenciado por el tamaño de partículas, siendo así, para tamaños superiores a 1µm se utilizará un microscopio convencional y para tamaños menores un microscopio electrónico.

## **Colectores magnéticos**

Estos dispositivos permiten la recolección de partículas por atracción magnética, esta técnica se utiliza como indicador de desgaste dado que no provee información acerca del tamaño ni del número de partículas.

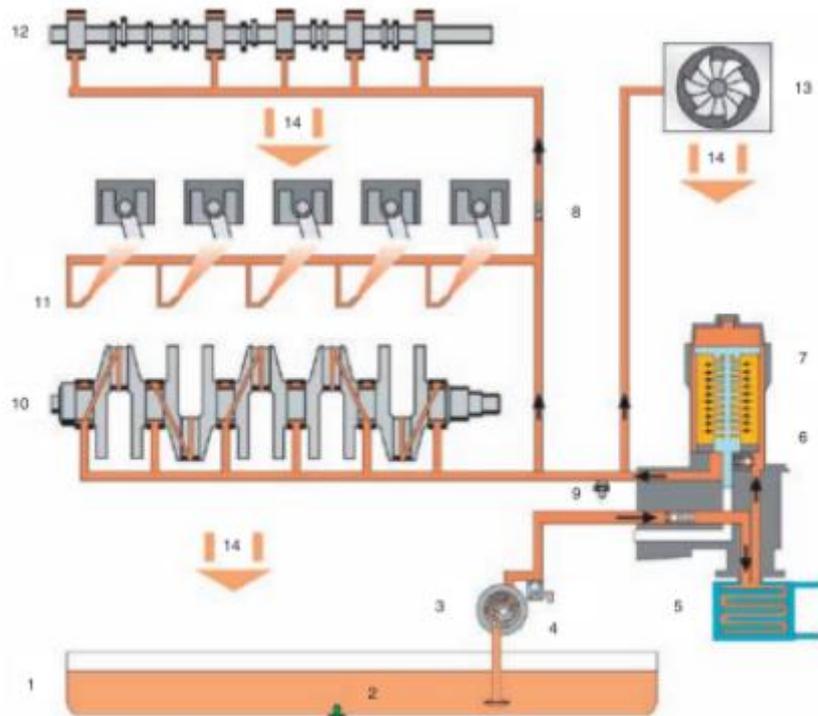
## **Particles quantifier index (PQI)**

El PQI determina la cantidad relativa de metales ferrosos en una muestra de aceite en función de la cantidad de residuos ferromagnéticos. Esta técnica consiste en pasar la muestra de aceite cerca de un campo de flujo magnético, el campo se distorsiona a medida que encuentra residuos ferromagnéticos en la muestra y es independiente del tamaño de las partículas, a la cantidad de distorsión del campo electromagnético se le expresa como IPQ. Esta técnica se usa junto a otro análisis como son: ferrografía y espectrometría (CIMAC, 2011).

## **Análisis de propiedades**

El análisis de las propiedades del aceite son fundamentalmente el comportamiento del motor mismo, un estudio detallado de los diferentes valores obtenidos en las muestras puede conllevar al alargamiento entre los periodos de cambio del lubricante, generando un ahorro sustancial en el consumo de lubricante y por ende económico. Establecer límites condinatorios en los diferentes parámetros nos ayudará a visualizar con mayor claridad un desbalance y así optar por soluciones instantáneas que nos ayuden a alargar la vida de nuestro motor, en la gráfica 6 podemos

observar de manera esquemática la interacción del aceite lubricante con los componentes del motor.



**Gráfica 6. Esquema circuito de lubricación a presión.** 1. Cárter 2. Sensor de nivel 3. Bomba 4. Válvula de descarga 5. Enfriador 6. Válvula bypass 7. Filtro 8. Válvula de retención 9. Sensor de presión 10. Apoyos cigüeñal 11. Inyectores de aceite 12. Apoyos árbol de levas 13. Turbocompresor 14. Retorno al cárter. Fuente: Motores térmicos y sus sistemas auxiliares-Calleja D. G.

Dentro del análisis de aceite empleado en la compañía Coordinadora mercantil S.A, podemos encontrar componentes de desgaste (Fe, Cu, Ni, etc.), contaminantes (agua, Na, Si, etc.), aditivos (Ca, Zn, P, etc.), condiciones del aceite (oxidación, nitración, sulfatación) y por último propiedades físicas (viscosidad, TBN,TAN, punto de inflamación) (Ochoa, 2011).

## Propiedades físicas

### Viscosidad

Se define la viscosidad como la resistencia de un fluido a fluir, es la oposición del fluido a ser cizallado (Soutullo, 2015). La viscosidad es una de la característica más importante en un análisis tribológico ya que esta se puede alterar por diferentes factores como se observa en la *Tabla 1*. La viscosidad del aceite lubricante se define a 100 °C según la norma SAE J300 y se expresa en centistokes (CIMAC, 2011).

**Tabla 2. Efectos característicos sobre la viscosidad.** Fuente: Diagnostico de motores diésel mediante análisis de aceite- Martínez B. T

	<b>Descenso de viscosidad</b>	<b>Aumento de viscosidad</b>
<b>Cambios en la estructura del lubricante</b>	-Ruptura de las moléculas -Degradación de los aditivos mejoradores del I.V.	-Polimerizaciones -Oxidación -Pérdidas por evaporación -Formación de lodos y lacas
<b>Contaminación</b>	-Combustible -Mezcla de aceites (de viscosidad inferior) -Disolventes	-Agua (emulsiones) -Espumas -Insolubles / Materia carbonosa -Mezcla de aceites (de viscosidad superior)

Conociendo las causas en la alteración de la viscosidad, podemos observar posibles alteraciones en el sistema lubricado.

#### Aumento de viscosidad

- Aumento en la generación de calor, que conlleva a un aumento en la oxidación del lubricante y formación de lodos.
- Cavitación.
- Formación inadecuada de la película lubricante (casquetes, rodamientos, etc.)
- Pérdidas de energía.
- Pobres características antiespumantes y demulsificantes.

#### Disminución de viscosidad

- Formación inadecuada de la película lubricante (casquetes, rodamientos, etc.).
- Alta fricción, que conlleva a un aumento de temperatura y oxidación del lubricante.
- Fugas de aceite lubricante.

#### **Total base number (TBN)**

El TBN se define como la reserva alcalina o básica que posee el aceite para neutralizar los ácidos provenientes de combustión y de la oxidación del aceite, también se define como la cantidad de ácido clorhídrico necesaria para neutralizar un gramo de aceite, el TBN se expresa en miligramos de potasio (mg KOH/g) (CIMAC, 2011). La reserva básica del aceite juega un papel crucial en la neutralización de los ácidos producto de la combustión, puesto que, el combustible contiene azufre el cual después de la combustión

se transforma en  $\text{SO}_2$ , el óxido de azufre se condensa en la pared del cilindro y es allí donde la reserva básica lo neutraliza (Martinez, 2005).

### **Total acid number (TAN)**

El TAN es la medida de acidez del aceite, no es muy utilizada en el monitoreo de motores diésel, se expresa como la cantidad de KOH necesaria para neutralizar el aceite (mg KOH/g). El TAN es principalmente usado en motores que funcionan con gas debido a estos presentan niveles altos de detergencia-dispesancia (CIMAC, 2011).

### **Punto de inflamación**

Se define como punto de inflamación a la temperatura mínima a la cual el aceite desprende la cantidad suficiente de vapores como para inflamarse y mantener la llama, esta medida se expresa en °C. El punto de inflamación disminuye a medida que aumenta la presencia de diluciones de combustible, sin embargo, normalmente el punto de inflamación aumenta con la degradación del aceite, puesto que, los volátiles suspendidos en el aceite se evaporan.

### **Condiciones del aceite**

#### **Oxidación, Nitración y Sulfatación**

La oxidación, nitración y sulfatación son junto a la viscosidad parámetros básicos para el control, estos a su vez se encuentran íntimamente ligados entre sí y son causantes de alteraciones en la viscosidad. Su aumento en el tiempo es un reflejo de posibles fallas en el motor o en sus sistemas auxiliares.

El aceite lubricante con el uso y con las altas temperaturas que experimenta tiende a su degradación, produciendo productos tales como ésteres, ácidos carboxílicos entre otros, estos productos acidifican el aceite consumiendo las reservas alcalinas del mismo. El proceso de oxidación del aceite también se debe a los metales de desgaste que actúan como catalizadores en la oxidación del aceite, los productos ácidos de la combustión provocan una degradación de este. La oxidación del aceite produce un aumento en la viscosidad y una posible actuación corrosiva producto de la acidificación (Martinez, 2005).

El fenómeno de la nitración resulta de la interacción del aceite con los  $\text{NO}_x$  producto de la combustión, este valor está relacionado con el tipo de mezcla empleado en la combustión, mezclas ricas producen niveles bajos de nitración, caso contrario con las mezclas pobres las cuales producirán altos

niveles de nitración (Martinez, 2005). El proceso de nitración genera un aumento en la viscosidad del aceite lubricante debido a la formación de barnices y lacas.

De manera paralela a la nitración, la sulfatación se produce por la oxidación de los componentes de azufre contenidos en los aditivos del lubricante o la contaminación del combustible, formando dióxido de azufre, consumiendo las reservas alcalinas del aceite. La sulfatación del aceite lubricante genera un espesamiento en el aceite, el cual sirve como indicador de degradación del aceite (CIMAC, 2011).

## **Aditivos**

Los niveles de aditivos obtenidos en la muestra no suelen usarse como medida de diagnóstico, debido a que cada fabricante de aceite suele utilizar diferentes concentraciones enfocadas en la necesidad del cliente. Los aditivos contenidos en la muestra (Ca, Zn, P, Mo, Mg, B) suelen usarse más como indicador del lubricante en uso o como indicador de mezcla con lubricantes de otras marcas u otros grados.

## **Contaminantes**

### **Agua**

Se considera el agua como el segundo elemento contaminante más destructivo, si esta no se elimina puede formar una emulsión, dicha emulsión reduce la capacidad de carga del lubricante, además genera un agotamiento en los aditivos (CIMAC, 2011). La contaminación por agua es un defecto que se debe investigar y corregir lo antes posible.

La incompresibilidad del agua respecto al aceite puede resultar en una pérdida de la película hidrodinámica del aceite, generando así un desgaste excesivo de las piezas y por último un reducción en la vida útil de la misma. Para un caso en específico como lo son los rodamientos, la presencia de agua no solo contribuye a la pérdida de la película hidrodinámica si no que también debido a las altas presiones y temperaturas que experimenta el aceite, se da un fenómeno de desprendimiento de las partículas de agua (cavitación) que conllevan a la erosión del rodamiento, ocasionando una fragilización de este (Barnes, 2001).

El agua no solo tiene influencia sobre los componentes del motor, también lo tiene sobre la degradación del aceite, esta juega un papel directo en el envejecimiento y la degradación del mismo, la presencia de agua hace que se multiplique por diez la oxidación del aceite (Barnes, 2001). En la *Tabla 2* se

observan algunas problemáticas asociadas a la presencia de agua en el lubricante.

**Tabla 3. Efectos asociados a la presencia de agua en el aceite lubricante.** Fuente: Diagnostico de motores diésel mediante análisis de aceite- Martínez B

PROBLEMA	EFECTOS	
Hidrólisis y oxidación	La presencia de agua conduce a cambios químicos y físicos en el aceite base.	Formación de ácidos Espesamiento del aceite Barnices y lodos
Aeración	El agua fomenta los problemas de aireación	Espuma Entrada de aire
Efectos en la viscosidad	El agua conduce a emulsiones estables, mayor viscosidad y propiedades no newtonianas del fluido	
Efectos dieléctricos	El agua reduce las propiedades aislantes del aceite	

### Combustible

La dilución de combustible en el aceite puede provenir de varios causantes como: inyectores defectuosos, bomba de combustible defectuosa, fugas en las líneas de combustible, daños en la camisa del pistón. La dilución de combustible en el aceite conlleva a efectos como:

- Pérdida en la viscosidad puesto que el combustible es menos viscoso que el aceite, dicha pérdida como se ya se ha expresado anteriormente genera una pérdida en la película lubricante lo que ocasiona un desgaste.
- Descenso en la concentración de aditivos
- Oxidación del aceite
- Incremento en las concentraciones de azufre, generando así riesgos de corrosión en el motor

### Hollín

La materia carbonosa está directamente relacionada con la propia degradación del aceite, con la eficiencia del sistema de filtrado, con el desgaste del sistema lubricado. La materia carbonosa se forma durante el proceso de la combustión y entra al cárter a través del aceite como gases de combustión.

Las posibles causas de una aparición elevada de hollín en el aceite lubricante son:

- Cambio de aceite extendido
- Baja compresión
- Alta relación combustible/aire
- Filtro de aire tapado

El alto contenido de materia carbonosa en el lubricante genera aumentos en la viscosidad, incremento en la tasa de desgaste, mayor formación de lodos y por último un aumento en la presión diferencial del filtro (Martinez, 2005).

### **Silicio**

Se considera el silicio como el elemento contaminante más destructivo, un aumento en el silicio repercute con mayor efectividad en el desgaste general del motor, su aumento se debe a diversas causas, sin embargo, la más general de todas es la introducción de polvo atmosférico, este penetra al motor por el sistema de filtrado (filtros ineficaces, rotos o sucios).

Una vez las partículas de polvo atmosférico hayan ingresado al aceite lubricante, estas pasarán a formar parte de la película de aceite lubricante formando un enlace directo entre las superficies, el resultado de esto es el desprendimiento entre las superficies, debido al arrastre de las partículas (Martinez, 2005). La introducción de estas partículas en las holguras entre superficies genera un cambio en la distribución de las cargas, pasando de ser una distribución "homogénea" a ser una distribución puntual generando un aumento de presión en ese punto, el aumento de presión puede ocasionar una flexión en la superficie y desencadenar una fatiga en el material.

El medio para evitar este desgaste por abrasión en las piezas del motor consiste en hacerlo tan impermeable como sea posible al paso del polvo atmosférico, filtrando de manera eficiente el aire que entra a la cámara de combustión.

## Sodio

El sodio es un elemento que proviene del líquido refrigerante, la fuga de líquido refrigerante en la cámara de combustión genera residuos sólidos, los cuales actúan como abrasivos generando desgaste de las piezas (Waldyr Fong Silva).

## Componentes de desgaste

El conocimiento exacto de la metalurgia de los motores a diagnosticar mediante el análisis de aceite lubricante es fundamental para la toma de decisiones de manera precisa y acertada (Martinez, 2005). Los metales obtenidos en una muestra de aceite tienen como origen diferentes procedencias como:

- Hierro (Fe): Camisas del pistón, tren de válvulas, cigüeñal, engranajes
- Cobre (Cu): Cojinetes
- Plomo (Pb): Cojinetes de biela y de bancada.
- Estaño (Sn): Cojinetes de biela y de bancada (recubrimiento trimetálico)
- Cromo (Cr): Segmentos del pistón
- Aluminio (Al): Contaminación con grasas, desgaste en el bloque, enfriador
- Silicio (Si): Aditivos antiespumante, polvo atmosférico, residuos
- Níquel (Ni): Cojinetes, contaminación del combustible
- Molibdeno (Mo): Aditivos, agua del refrigerante

**Tabla 4. Valores de referencia para elementos de desgaste.** Unidades en partes por millón (ppm). Fuente: Shell lube-analyst.

<b>Metal</b>	<b>Posible Fuente del Metal</b>	<b>Normal</b>	<b>Precaución</b>	<b>Crítico</b>	
Fierro	Fe	Engranajes, rodamientos, separadores	0 - 60	101 - 180	>180
Cromo	Cr	Rodamientos	0 - 2	7 - 10	>10
Plomo	Pb	Arandelas, Discos de Fricción	0 - 8	16 - 20	>20
Cobre	Cu	Arandelas, Discos de Fricción	0 - 70	121 - 200	>200
Estaño	Sn	Arandelas de empuje	0 - 6	13 - 18	>18
Aluminio	Al	Tierra, Convertidor, Estator/Impulsor	0 - 4	11 - 15	>15
Silicio	Si	Tierra, Anti espumantes	0 - 20	31 - 40	>40
Sodio	Na	Sai, Posiblemente aditivos	0 - 30	51 - 80	>80

## Estrategias de lubricación

Las estrategias de lubricación tienen como objetivo mejorar la vida de los motores, estas estrategias tienen como base el nivel de desempeño del aceite lubricante, su almacenamiento, manejo, aplicación, monitoreo-diagnóstico y la toma de decisiones que ayudan a identificar modos de falla ya sean frecuentes o no.

Un lubricante limpio sin contaminantes como pueden ser: metales, diluciones de combustible, humedad, etc., es ideal para aumentar la vida útil del motor, más allá de lo estipulado por el fabricante, sin embargo, lograr tener un aceite limpio es una tarea difícil, debido a la forma de operación del motor, puesto que un motor aspira grandes cantidades de aire, el cual viene con partículas indeseadas (Si, H<sub>2</sub>O), también ocurren descalibraciones en los sistemas de inyección produciendo diluciones de combustible en el aceite, los sistemas de enfriamiento y las piezas de la misma maquinaria contribuyen también a la degradación del aceite. Las estrategias de lubricación consisten en controlar el ingreso de estos contaminantes, con el fin de disminuir la probabilidad de fallas.

Para poner en práctica estas estrategias de lubricación, de modo que el aceite se mantenga limpio dentro de la maquinaria, es necesario primeramente conocer el contexto operacional de la compañía, con el fin de optimizar y maximizar los objetivos de la compañía. Algunas mejoras a implementar incluyen: herramientas para la aplicación del lubricante, entrenamiento del personal, instalar puntos de muestreo en los motores, implementación del análisis de aceite, mejorar el sistema de filtración (aire, aceite, combustible), inspecciones rutinarias dirigidas a los modos de fallo comunes y por último una creación de una matriz de toma de decisiones.

Las estrategias antes descritas que se pueden clasificar en dos grupos: el primero consiste en la mejora de las prácticas de lubricación y control de contaminantes, la segunda consiste en la medición y control mediante el análisis de aceite. El diseño de pruebas de rutina con alta frecuencia enfocadas en los modos de falla, permitirá identificar las tendencias y confirmar problemas y fallas. Estandarizar los modos de falla en una matriz de diagnóstico, pronóstico y acciones recomendadas permite tomar decisiones a nivel de flota e individual (Soutullo, 2015).

## Recomendaciones para toma de decisiones

La *tabla 4* es una recopilación de acciones recomendadas para la toma de decisiones proporcionada por el fabricante del aceite lubricante.

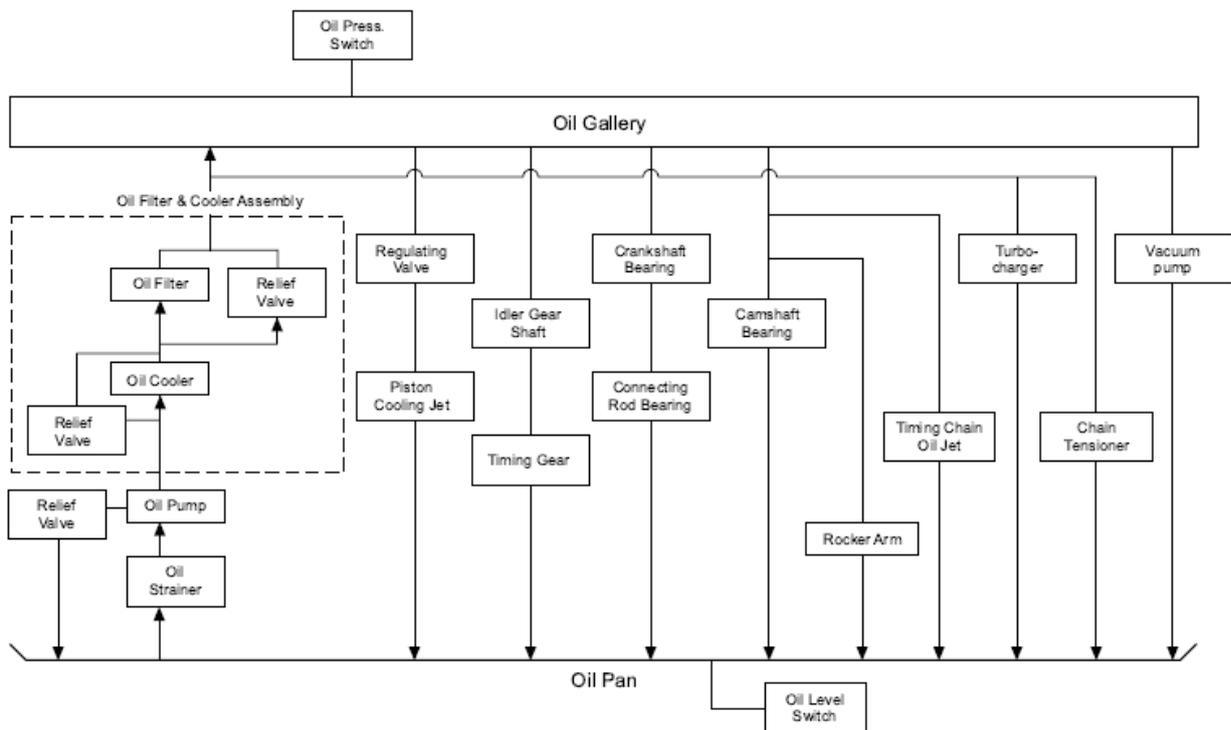
**Tabla 5. Acciones recomendadas.** Fuente: elaboración propia-Shell lube-analyst.

Ensayo/estado	Normal	Marginal	Atención	Acción	
				Lim. Inf.	Lim. Sup.
Viscosidad a 100°C (cSt)	12,5 - 16,3	12 - 16,5	-	< 11,5	> 18,7
	Recomendaciones				
	Viscosidad baja		Viscosidad alta		
	Revisar:		Revisar:		
	Operación en mínima		Recalentamiento del motor		
	Filtro de aire tapado		Periodo de cambio excedido		
	Sistema de Inyección		Filtro de aire tapado		
	Perdidas de compresión		Sincronización		
Relleno con aceite de menor viscosidad		Entrada de líquido refrigerante			
Silicio (ppm)	0 - 20,0	21,0 - 30,0	31,0 - 60,0	-	> 80,0
	Recomendaciones				
	Alto silicio y desgaste		Alto silicio sin desgaste		
	Revisar:		Revisar:		
	Sistema de filtración		Tarros de toma de muestras		
	Contaminación del aceite		Mangueras contaminadas		
TBN (mg KOH/g)	10,0	-	-	< 5,0	> 12
	Recomendaciones				
	TBN Bajo				
	Revisar:				
	Sistema de filtración				
	Anillos del pistón				
Contenido de azufre en el combustible					
Oxidación (Abs/0.1 mm)	0 - 0,20	-	0,20 - 0,30	-	> 0,30
	Recomendaciones				
			Oxidación alta		
			Revisar:		
			Sistema de filtración		
			Sistema de inyección		
Nitración (Abs/0.1 mm)	0 - 0,25	-	0,26 - 0,30	-	> 0,30
	Recomendaciones				
			Nitración alta		
			Revisar:		
			Sistema de filtración		
			obstrucción múltiple admisión		
Sulfatación (Abs/0.1 mm)	0 - 0,25	-	0,26 - 0,30	-	> 0,30
	Recomendaciones				
			Sulfatación alta		
			Revisar:		
			Sistema de inyección		
			Contenido de azufre en el combustible		
Contenido de agua (% v/v)	0 - 0,1	-	0,1 - 0,20	-	> 2,0
	Recomendaciones				
			Contenido de Agua		
			Revisar:		
		Sistema de refrigeración			

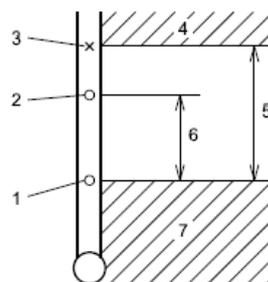
## Metodología

La metodología seguida durante del presente proyecto realizado en la compañía Coordinadora mercantil S.A.S. se basó en las siguientes etapas:

En la *gráfica 7* se observa de forma esquemática el sistema de lubricación de los motores Isuzu 4JJ1, se observa el recorrido total del aceite lubricante, además de las líneas por las que se suministra a las diferentes piezas. Dentro de las estrategias de lubricación recomendadas por el fabricante con el fin de preservar el motor se recomienda: inspeccionar el nivel de aceite *gráfica 8*, se recomienda usar aceite Besco 10w-30, cambiar el filtro de aceite y el aceite cada 20.000 km, inspeccionar la presión de aceite la cual debe estar en 340 kPa a 2800 rpm, chequear el switch de presión de aceite (Isuzu).

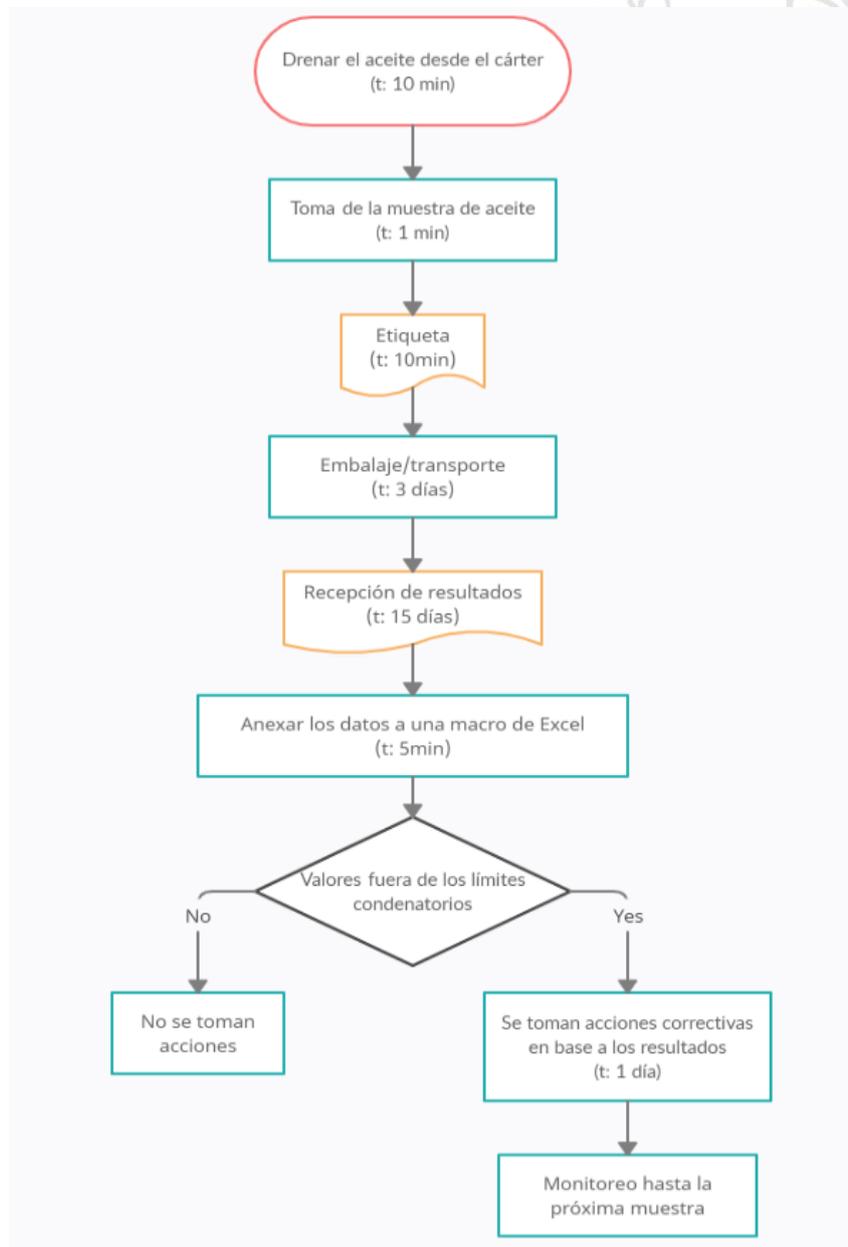


**Gráfica 7. Esquema sistema de lubricación motores Isuzu 4JJ1.** Fuente: (Isuzu).



**Gráfica 8. Inspección nivel de aceite.** 1. Mínimo 2. Optimo 3. Máximo para inspección 4. Cambio de aceite 5. Nivel aceptable de aceite 6. Adicionar aceite hasta el máximo 7. Reposición de aceite. Fuente: (Isuzu).

1. Se definió el contexto operacional de la toma de muestras de aceite, la cual se realizaba por drenaje de aceite desde cárter, ésta muestra se tomaba en periodos de seis meses o 8000 km, ya que este es el tiempo estipulado para el cambio de aceite. Una vez tomadas las muestras, se procedía a etiquetarlas y enviarlas al laboratorio para su posterior análisis, con los resultados obtenidos se anexaban a una macro en Excel, la cual resalta valores fuera de los límites condenatorios, con estos valores se dictaminaba si se debían tomar medidas correctivas.



Gráfica 9. Diagrama de flujo toma de muestras y análisis. Fuente: elaboración propia.

2. Se realizó una revisión bibliográfica con ayuda del asesor interno, mediante sistema de indexación y resumen Scopus con el fin de filtrar información de las bases de datos. Se filtró por motores diésel/análisis de aceite/material particulado/ relevancia.

- Primer algoritmo

```
TITLE("OIL ANALYSIS") AND ( LIMIT-TO ( EXACTKEYWORD,"Oil Analysis" ) OR LIMIT-TO ( EXACTKEYWORD,"Lubricating Oils" ) OR LIMIT-TO ( EXACTKEYWORD,"Diesel Engines" ) OR LIMIT-TO ( EXACTKEYWORD,"LUBRICATING OILS - Analysis" ) ) AND ( LIMIT-TO ( EXACTKEYWORD,"Engines" ) OR LIMIT-TO ( EXACTKEYWORD,"Lubrication" ) OR LIMIT-TO ( EXACTKEYWORD,"Predictive Maintenance" ) OR LIMIT-TO ( EXACTKEYWORD,"Tribology" ) OR LIMIT-TO ( EXACTKEYWORD,"Diesel Engine" ) OR LIMIT-TO ( EXACTKEYWORD,"Particle Size Analysis" ) )
```

**244 document results**

- Segundo algoritmo

```
( TITLE ( "engine oil analysis" ) AND KEY ( "Diesel engines" ) )
```

**7 document results**

- Tercer algoritmo

```
TITLE(exhaust particulate emissions) AND ( LIMIT-TO ( SUBJAREA,"ENGI" ) OR LIMIT-TO ( SUBJAREA,"CENG" ) ) AND ( LIMIT-TO ( EXACTKEYWORD,"Diesel Engines" ) OR LIMIT-TO ( EXACTKEYWORD,"Particulate Emissions" ) OR LIMIT-TO ( EXACTKEYWORD,"Particulate Matter" ) OR LIMIT-TO ( EXACTKEYWORD,"Engines" ) OR LIMIT-TO ( EXACTKEYWORD,"Particles (particulate Matter)" ) )
```

**85 document results**

3. Se clasificaron los papers, libros y reviews. Se realizó una lectura detallada de cada uno con el fin de establecer estrategias de lubricación, recolección de muestras, correlaciones entre los resultados del análisis de aceite y por último un modelo que permita correlacionar las muestras de aceite con el material particulado a la salida de los gases de escape. En la *tabla 5* se observan bajo qué criterios se filtró la información, los trabajos que fueron seleccionados son los que contenían la información más relevante y aplicados a motores diésel.

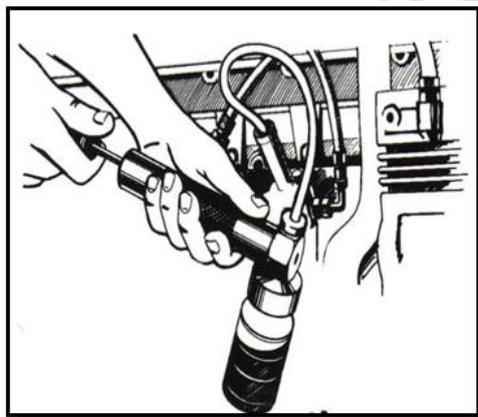
**Tabla 6. Criterios de clasificación de la información.** Fuente: elaboración propia.

	Estregias de lubricación	Recolección de muestras	Correlación de resultados	Estimación de material particulado a partir del análisis
Número de trabajos encontrados	3	2	2	4

4. Se desarrolló una entrevista con un experto en el tema de tomas de muestras de aceite y análisis de resultados. Se obtuvieron ideas de mejoras en el tema de muestreo, además de correlaciones entre en los elementos de las muestras de aceite, se establecieron límites en las correlaciones debido a que los resultados obtenidos por parte de la compañía no cuentan con estos parámetros.
5. Se tomaron dos muestras comparativas, una de la forma que se realizaba drenando el aceite desde el cárter *gráfica 10* y la otra mediante una bomba de vacío *gráfica 11* extrayendo el aceite desde la varilla medidora. En la *tabla 6* se expresan los parámetros de muestreo.



**Gráfica 10. Aceite drenado desde el cárter.** Fuente: Shell lube-analyst.



**Gráfica 11. Aceite drenado desde una bomba de vacío.** Fuente: Shell lube-analyst.

**Tabla 7. Parámetros de muestreo.** Fuente: elaboración propia.

Parámetro de muestreo	Aceite drenado desde el cárter	Aceite drenado desde la bomba de vacío
Elementos de muestreo	Frasco de muestra	Frasco de muestra, bomba de vacío
Motor en marcha	No	Sí
Temperatura aceite	23 °C	90 °C
Tiempo de recolección	2 minutos	20 minutos
Almacenamiento	7 horas	7 horas

6. Se analizaron los resultados obtenidos de las muestras comparativos y se estableció una mejora en el tema de recolección de muestras de aceite; de acuerdo a la bibliografía se establecieron correlaciones entre los diferentes parámetros y se estableció un modelo que correlaciona el análisis de aceite con el material particulado. Se recomienda implementar índices como son el IPQ y el TBN, dado que estos permitirán decisiones más acertadas

## Resultados y análisis

### Comparativa métodos de muestreo

A continuación, se realizó una comparativa entre los resultados obtenidos para la forma tradicional de toma de muestras, la cual se realizaba drenando aceite desde el cárter con el motor estático a temperatura ambiente, y una forma alternativa que se realiza con una bomba de vacío drenando el aceite desde la varilla medidora, para este método se recomienda que el motor este en servicio a la temperatura de operación (CIMAC, 2011), sin embargo, para tener resultados más precisos se recomienda instalar puntos de muestreo en el motor. La comparativa se ejecutó en las móviles 2397 y 2448, ambas con motores Isuzu 4JJ1.

Para la toma de muestra por bomba de vacío se siguieron las siguientes recomendaciones establecidas por el Consejo Internacional de Motores de combustión (CIMAC), presente en el artículo Used Engine Oil Analysis- Interpretation Guide, donde además se recomienda evitar tomar muestras de conductos de desagüe debido a que allí se almacenan lodos y demás contaminantes, reduciendo la oportunidad de obtener un diagnóstico útil:

- Tomar la muestra cuando la máquina esté funcionando a la temperatura normal de funcionamiento, nunca cuando el equipo esté parado o frío, o después de cualquier adición significativa de aceite fresco.

- Tome la muestra después de lavar una pequeña cantidad de aceite (0,5 - 1,0l) a través del punto de muestreo -y sin operar la válvula de muestreo entre el lavado y el muestreo-.
- Siempre que sea posible, llene la muestra directamente en el frasco de muestreo para evitar cualquier contaminación innecesaria.
- Utilice únicamente equipos de muestreo limpios y secos destinados a la toma de muestras de aceites usados.

**Tabla 8. Valores de referencia.** Fuente: Shell lube-analyst.

Ensayo/Estado	Normal	Marginal	Atención		Acción	
			Limite Inferior	Limite Superior	Limite Inferior	Limite Superior
Viscosidad a 100°C (cSt.)	12.5 a 16.3	12.0 a 16.5			<11.5	>18.7
TBN (mgKOH/gr)	10				<5.0	>12
Hollin (Abs/0.1 mm)	0 - 0.50	0.51 - 0.70	NA	0.70 a 1.1	NA	>1.1
Oxidación (Abs/0.1 mm)	0 - 0.20		NA	0.20 - 0.30	NA	>0.3
Nitración (A/0.1 mm)	0 - 0.25		NA	0.26 - 0.30	NA	> 0.3
Sulfatación (A/0.1 mm)	0 - 0.25		NA	0.26 - 0.30	NA	> 0.3
Contenido de agua (% v/v)	0 - 0.1		NA	0.1 - 0.20	NA	>0.2
Volátiles %	0 - 3		NA	3.0 - 6.0	NA	>6.0

**Tabla 9. Resultados obtenidos móvil 2397- aceite drenado desde el cárter.**  
Fuente: Elaboración propia-Shell lube-analyst

Physical Characteristics	
Viscosity 100°C cSt	14.0
TBN (D 2896) mg KOH/g	UTT*
TAN (D 664) mg KOH/g	UTT*
Contamination	
Water (FT-IR) %	0.00
Glycol (FT-IR) %	0.00
Sodium (Na) ppm	8
Silicon (Si) ppm	! 15
Fuel (FT-IR) %	0.00
Soot (FT-IR) Abs cm <sup>-1</sup>	0.13
Oil Condition	
Oxidation (FT-IR) Abs cm <sup>-1</sup>	0.08
Nitration (FT-IR) Abs cm <sup>-1</sup>	0.08
Sulfation (FT-IR) Abs cm <sup>-1</sup>	0.00

**Tabla 10. Resultados obtenidos móvil 2397-Aceite drenado desde bomba de vacío.**  
Fuente: Elaboración propia-Shell lube-analyst

Physical Characteristics	
Viscosity 100°C cSt	14.6
TBN (D 2896) mg KOH/g	UTT*
TAN (D 664) mg KOH/g	UTT*
Contamination	
Water (FT-IR) %	0.00
Glycol (FT-IR) %	0.00
Sodium (Na) ppm	7
Silicon (Si) ppm	! 12
Fuel (FT-IR) %	0.00
Soot (FT-IR) Abs cm <sup>-1</sup>	0.11
Oil Condition	
Oxidation (FT-IR) Abs cm <sup>-1</sup>	0.02
Nitration (FT-IR) Abs cm <sup>-1</sup>	0.01
Sulfation (FT-IR) Abs cm <sup>-1</sup>	0.00

**Tabla 11. Resultados obtenidos móvil 2448-Aceite drenado desde el cárter.**  
Fuente: Elaboración propia-Shell lube-analyst

Physical Characteristics	
Viscosity 100°C cSt	13.4
TBN (D 2896) mg KOH/g	UTT*
TAN (D 664) mg KOH/g	UTT*
Contamination	
Water (FT-IR) %	0.00
Glycol (FT-IR) %	0.00
Sodium (Na) ppm	6
Silicon (Si) ppm	8
Fuel (FT-IR) %	0.00
Soot (FT-IR) Abs cm <sup>-1</sup>	0.08
Oil Condition	
Oxidation (FT-IR) Abs cm <sup>-1</sup>	0.07
Nitration (FT-IR) Abs cm <sup>-1</sup>	0.05
Sulfation (FT-IR) Abs cm <sup>-1</sup>	0.02

**Tabla 12. Resultados obtenidos móvil 2448-Aceite drenado desde bomba de vacío.**  
Fuente: Elaboración propia-Shell lube-analyst

Physical Characteristics	
Viscosity 100°C cSt	14.1
TBN (D 2896) mg KOH/g	UTT*
TAN (D 664) mg KOH/g	UTT*
Contamination	
Water (FT-IR) %	0.00
Glycol (FT-IR) %	0.00
Sodium (Na) ppm	6
Silicon (Si) ppm	6
Fuel (FT-IR) %	0.00
Soot (FT-IR) Abs cm <sup>-1</sup>	0.07
Oil Condition	
Oxidation (FT-IR) Abs cm <sup>-1</sup>	0.05
Nitration (FT-IR) Abs cm <sup>-1</sup>	0.05
Sulfation (FT-IR) Abs cm <sup>-1</sup>	0.01

**Tabla 13. Technical data sheet Shell Rimula R4 X 15W-40.** Fuente: Shell

Properties			Method	Shell Rimula R4 X
Grado de viscosidad SAE				15W-40
Viscosidad cinemática	@40°C	mm <sup>2</sup> /s	ASTM D445	109
Viscosidad cinemática	@100°C	mm <sup>2</sup> /s	ASTM D445	14.7
Viscosidad dinámica	@-20°C	mPas	ASTM D5293	6700
Índice de viscosidad			ASTM D2270	139
TBN	mgKOH/g		ASTM D2896	10.5
Cenizas sulfatadas	%		ASTM D874	1.45
Densidad	@15°C	kg/l	ASTM D4052	0.888
Punto de inflamación	COC	°C	ASTM D92	230
Punto de congelación			ASTM D97	-36

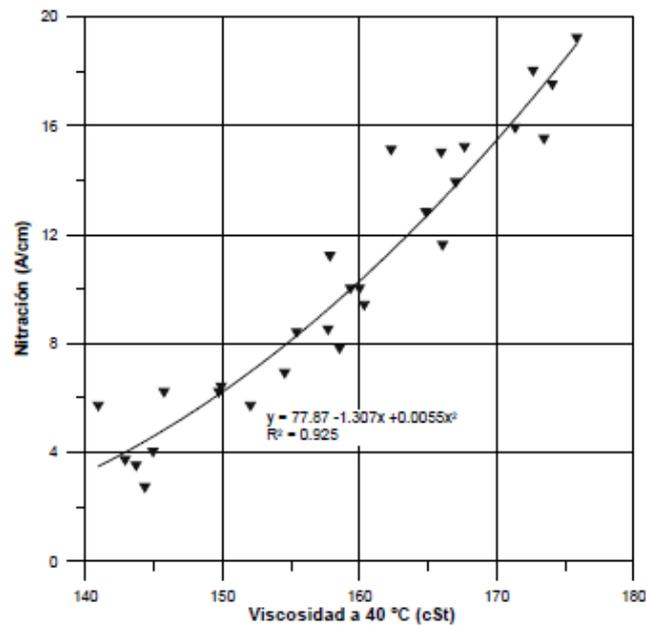
De acuerdo a los resultados conseguidos para las móviles 2397 y 2448, se observa una diferencia entre los valores obtenidos en la recolección de la muestra de forma tradicional, drenando el aceite a temperatura ambiente y estático desde el cárter, con respecto a la forma que se recomienda por Consejo Internacional de Motores de combustión (CIMAC), que consiste en drenar el aceite desde una bomba de vacío con el motor en su temperatura de operación y operando, se presenta una desviación aproximada de 22 % de la muestra tomada de forma tradicional con respecto a la recomendada por CIMAC, realizando la toma de muestras con este método se aumenta la confiabilidad de los resultados permitiendo tomar decisiones más acertadas.

Principalmente estas variaciones en los resultados se presentan debido a que; el aceite drenado desde el cárter contiene lodos y demás precipitaciones las cuales alteran las propiedades del aceite, en comparación con el aceite drenado desde la bomba de vacío con el motor en operación el cual se encuentra recorriendo los diferentes conductos del motor, por consiguiente, sus resultados se acercan aún más a las condiciones en las que se encuentra el motor.

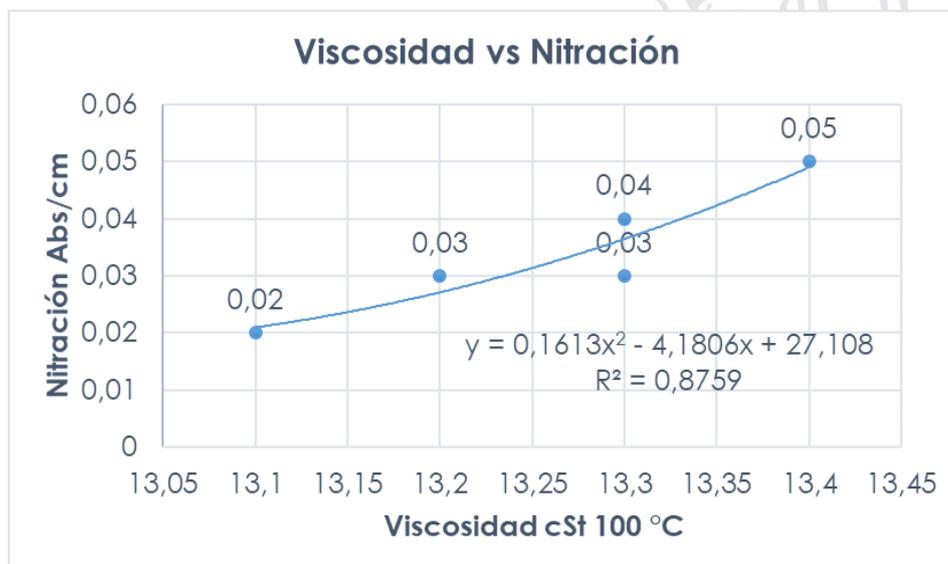
Un claro ejemplo de lo anterior es la viscosidad la cual se ve afectada por; componentes de desgaste, contaminantes y condiciones del aceite. Los resultados alcanzados para las móviles 2397 y 2448 dan como resultado una viscosidad menor para las muestras tomadas desde el cárter *tabla 8* y *tabla 10*, 14.0 cSt y 13.4 cSt respectivamente, en comparación con las muestras tomadas drenando el aceite desde la boba de vacío *tabla 9* y *tabla 11*, 14.6 cSt y 14.1 cSt respectivamente, se observa que estos últimos se encuentran más cercanos de la viscosidad base 14.7 cSt *tabla 12*, como ya se expuso anteriormente estos se ven afectados por los diferentes lodos y precipitación que se encuentran en el fondo del cárter.

## Correlaciones

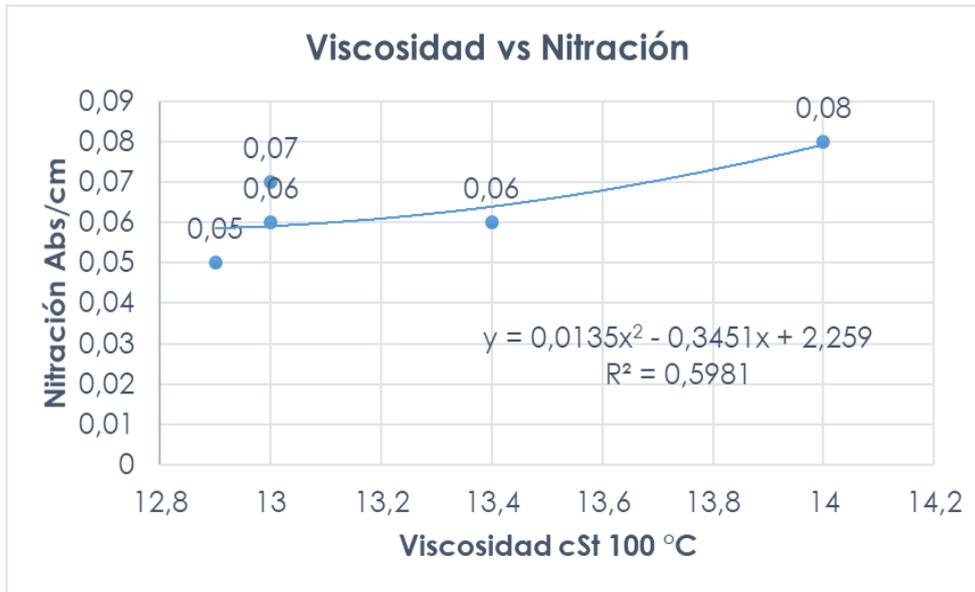
Se establecieron correlaciones típicas y recomendadas del análisis de aceite (Martinez, 2005) entre los diferentes resultados obtenidos en el análisis de aceite, con el fin de realizar un análisis causa-raíz. Las diferentes correlaciones se desarrollaron a partir de los años 2020/2021, las muestras fueron tomadas drenando el aceite desde el cárter.



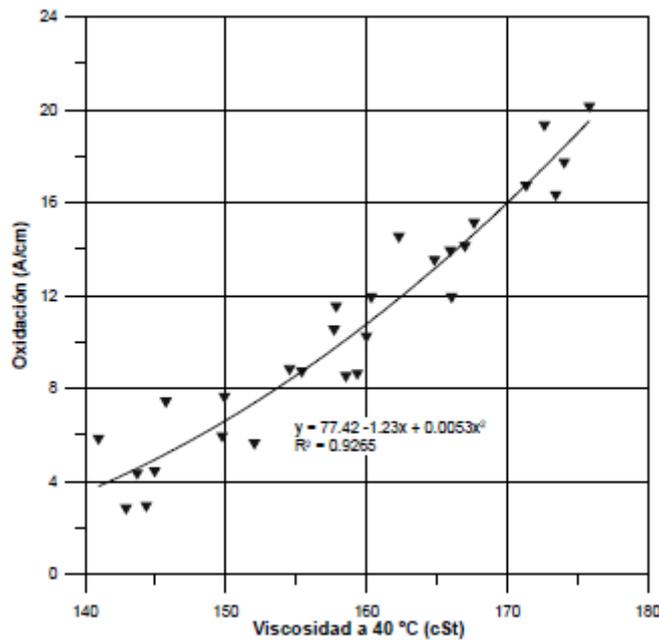
Gráfica 12. Referencia Viscosidad vs Nitración. Fuente: (Martinez, 2005).



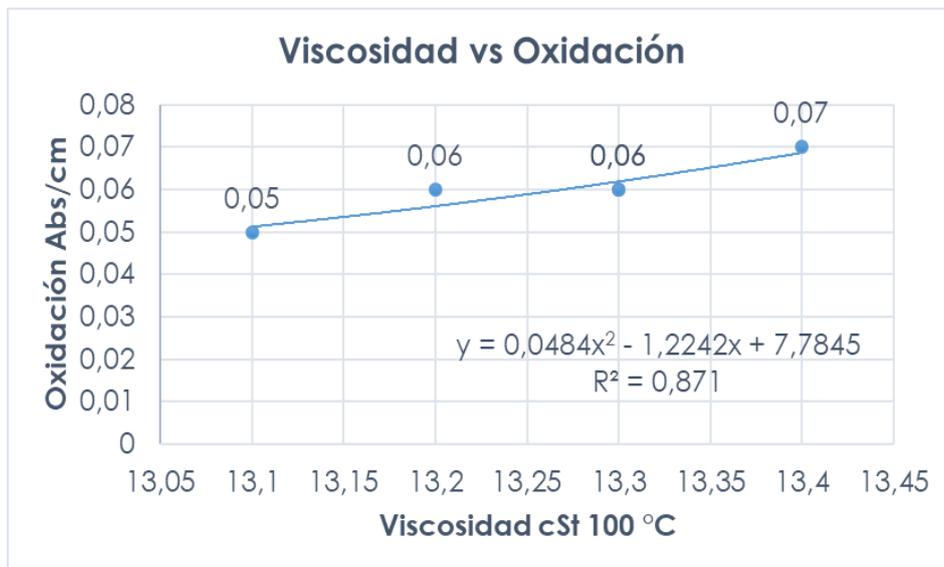
Gráfica 13. Viscosidad vs Nitración-móvil 2448. Fuente: Elaboración propia.



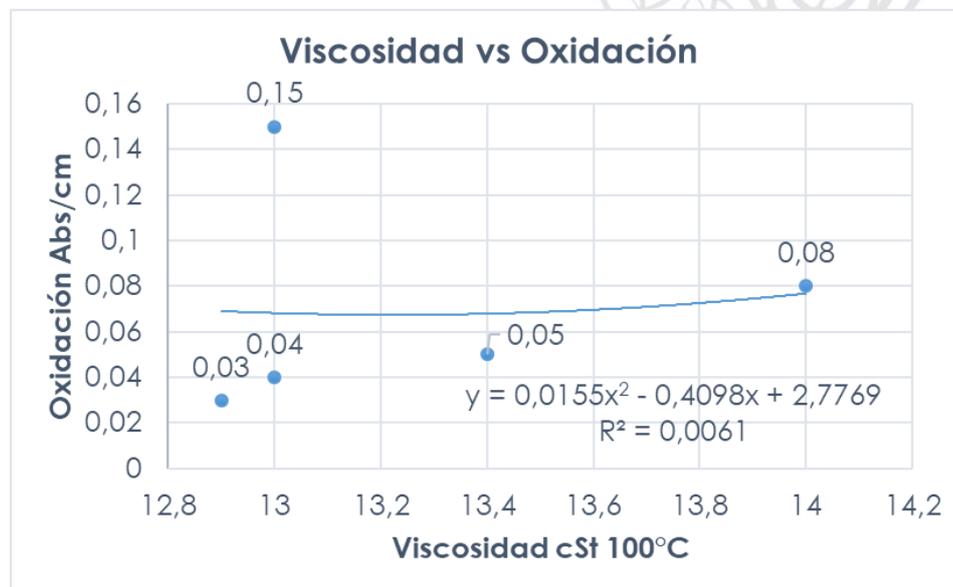
Gráfica 14. Viscosidad vs Nitración-móvil 2397. Fuente: elaboración propia.



Gráfica 15. Referencia Viscosidad vs Oxidación. Fuente: (Martinez, 2005).



**Gráfica 16. Viscosidad vs Oxidación-móvil 2448.** Fuente: elaboración propia.



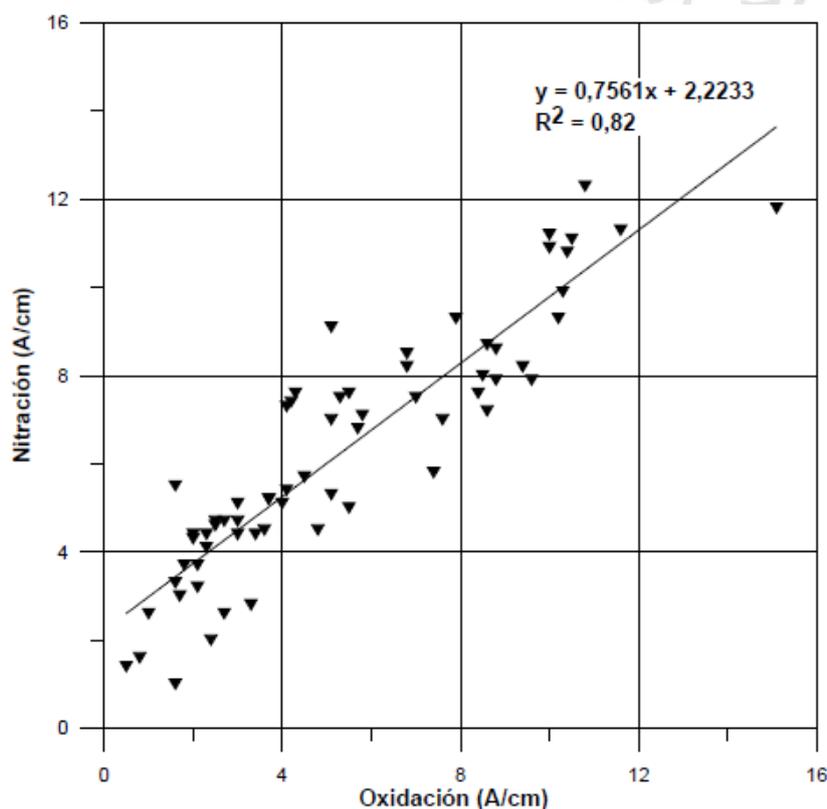
**Gráfica 17. Viscosidad vs Oxidación-móvil 2397.** Fuente: elaboración propia.

El proceso de nitración resulta de la interacción entre los NO<sub>x</sub> (óxidos de nitrógeno) y el aceite lubricante, este proceso causa un aumento en la viscosidad como se observa en las *gráficas 13 y 14* debido a la formación de barnices y lacas. Al igual que en el caso anterior el proceso de oxidación del aceite causa un aumento en la viscosidad acorde a lo que se observa en la *gráfica 16*, sin embargo, no es así para la *gráfica 17* la cuál presenta un comportamiento atípico puesto que, se presenta un valor de 0,15 Abs/cm en la oxidación y 13 cSt para la viscosidad, este valor atípico se atribuye a un desbalance en los aditivos; Calcio (Ca), Magnesio (Mg) y Boro (B), *tabla 13* sin embargo no se tiene certeza de esto, por lo que se recomienda utilizar un análisis con valores como son TBN y PQI, los cuales no están presentes en el análisis con el que se cuenta en la compañía.

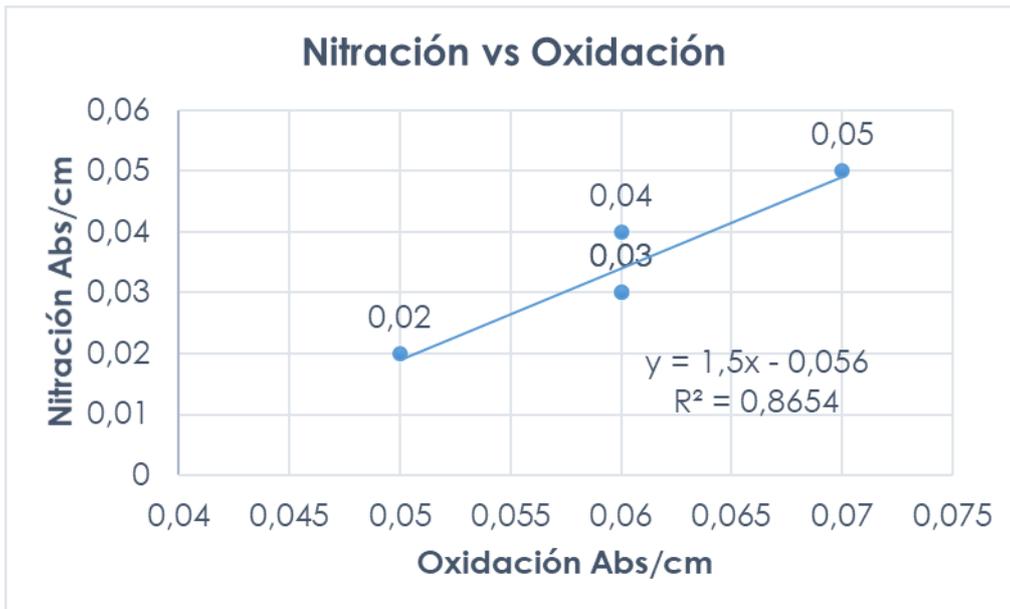
**Tabla 14. Valores atípicos aditivos-móvil 2397.** Fuente: Elaboración propia-Shell lube-analyst.

Physical Characteristics					
Viscosity 100°C cSt	14.0	13.4	13.0	13.0	12.9
Additives					
Calcium (Ca) ppm	3741	3678	2226	3649	3641
Zinc (Zn) ppm	1319	1393	1340	1359	1384
Phosphorus (P) ppm	1216	1300	1219	1214	1284
Molybdenum (Mo) ppm	45	46	50	43	39
Magnesium (Mg) ppm	31	87	324	17	17
Boron (B) ppm	483	411	208	407	427
Oil Condition					
Oxidation (FT-IR) Abs cm <sup>-1</sup>	0.08	0.05	0.15	0.04	0.03
Nitration (FT-IR) Abs cm <sup>-1</sup>	0.08	0.06	0.07	0.06	0.05
Sulfation (FT-IR) Abs cm <sup>-1</sup>	0.00	0.06	0.03	0.04	0.02

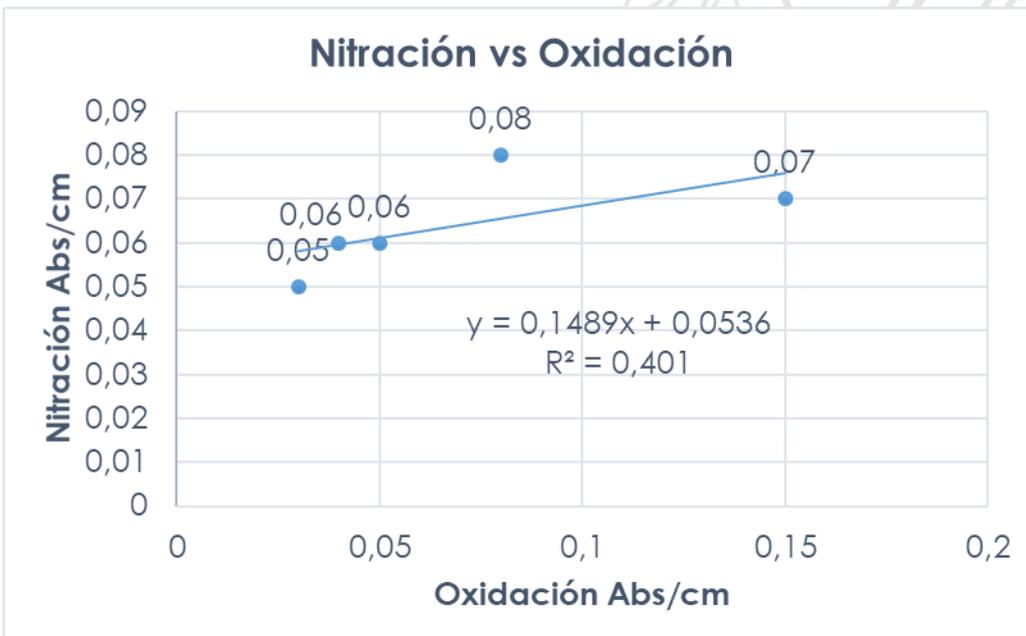
La evolución de las gráficas 13 y 16 es similar por lo que se establece una correlación entre la nitración y la oxidación gráfica 19, presentando un comportamiento lineal. Para las gráficas 14 y 17 no se presenta claramente el comportamiento puesto que se presentó un desbalance ya antes explicado, por esta razón en la gráfica 20 no se ve tal comportamiento.



**Gráfica 18. Referencia Oxidación vs Nitración.** Fuente: (Martínez, 2005).

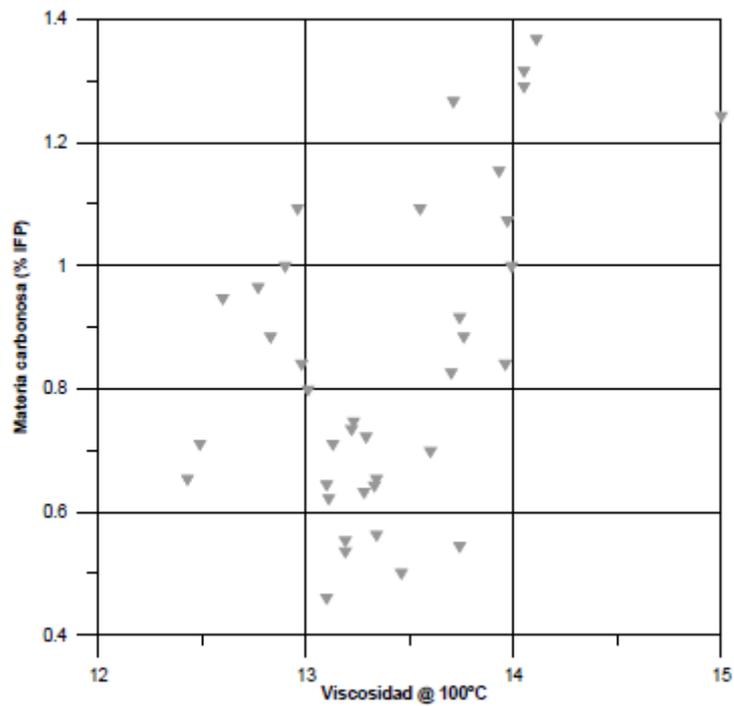


**Gráfica 19. Nitración vs Oxidación-móvil 2448.** Fuente: elaboración propia.

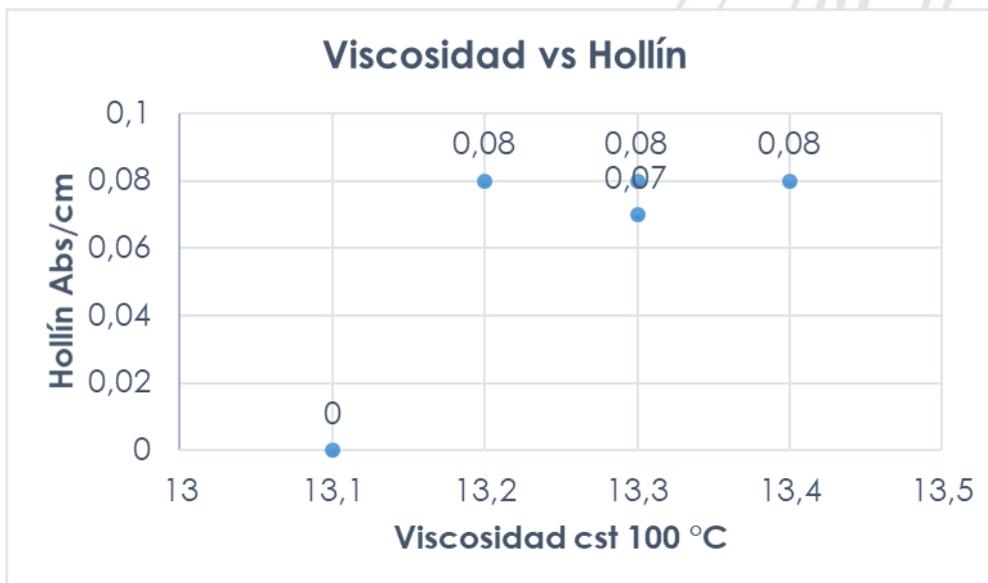


**Gráfica 20. Nitración vs Oxidación-móvil 2397.** Fuente: elaboración propia.

Dentro de los valores que afectan la viscosidad del aceite se encuentra el Hollín, el cual con su aumento incrementa la viscosidad como se puede observar en la *gráfica 22*, sin embargo, en la *gráfica 23* no se presenta esta correlación con claridad debido a que las diluciones con combustible disminuyen la viscosidad tal y como se observa en la *gráfica 25* donde con el aumento de diluciones de combustible se observa notablemente disminuida la viscosidad.



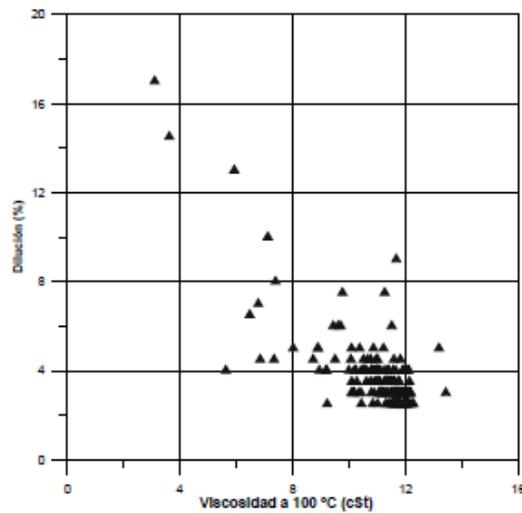
Gráfica 21. Referencia Hollín vs Viscosidad. Fuente: (Martinez, 2005)



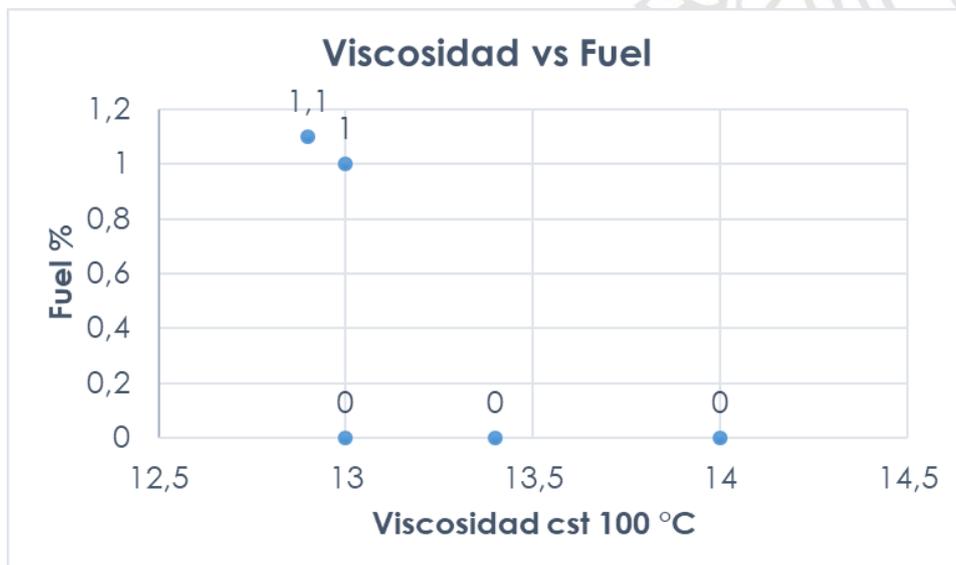
Gráfica 22. Viscosidad vs Hollín-móvil 2448. Fuente: elaboración propia.



Gráfica 23. Viscosidad vs Hollín-móvil 2397. Fuente: elaboración propia.

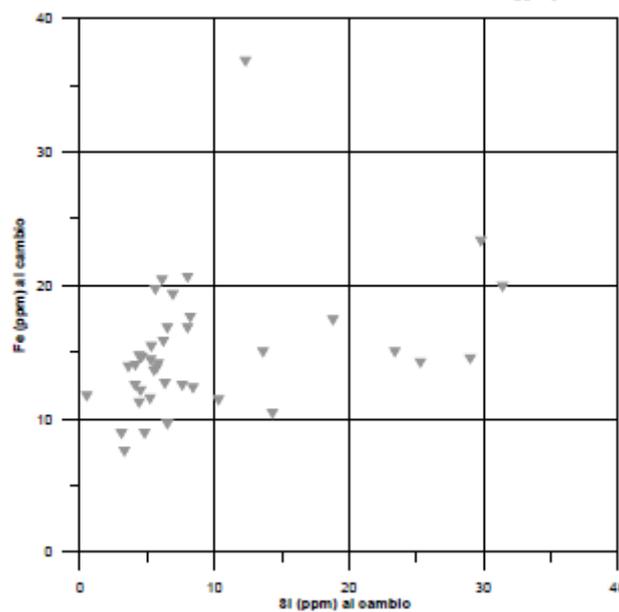


Gráfica 24. Referencia Fuel vs Viscosidad. Fuente: (Martinez, 2005).

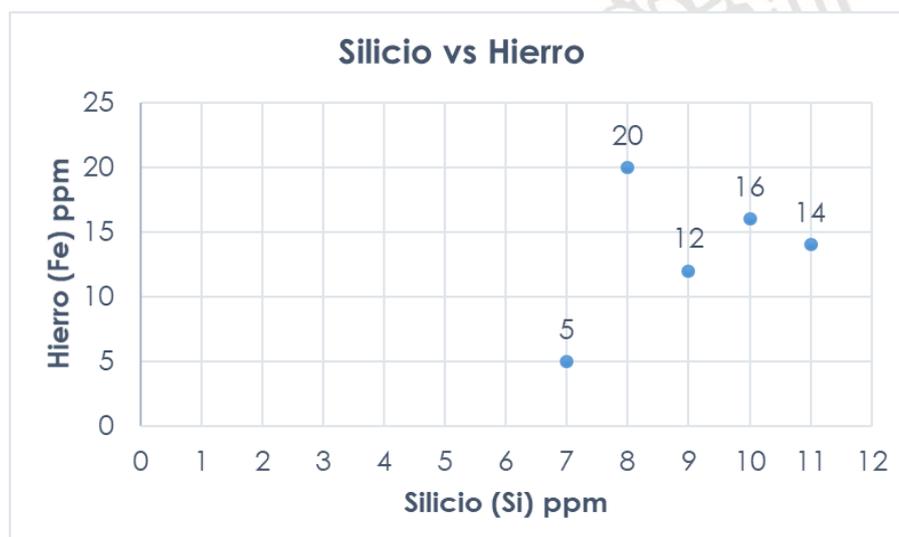


Gráfica 25. Viscosidad vs Fuel-móvil 2397. Fuente: elaboración propia.

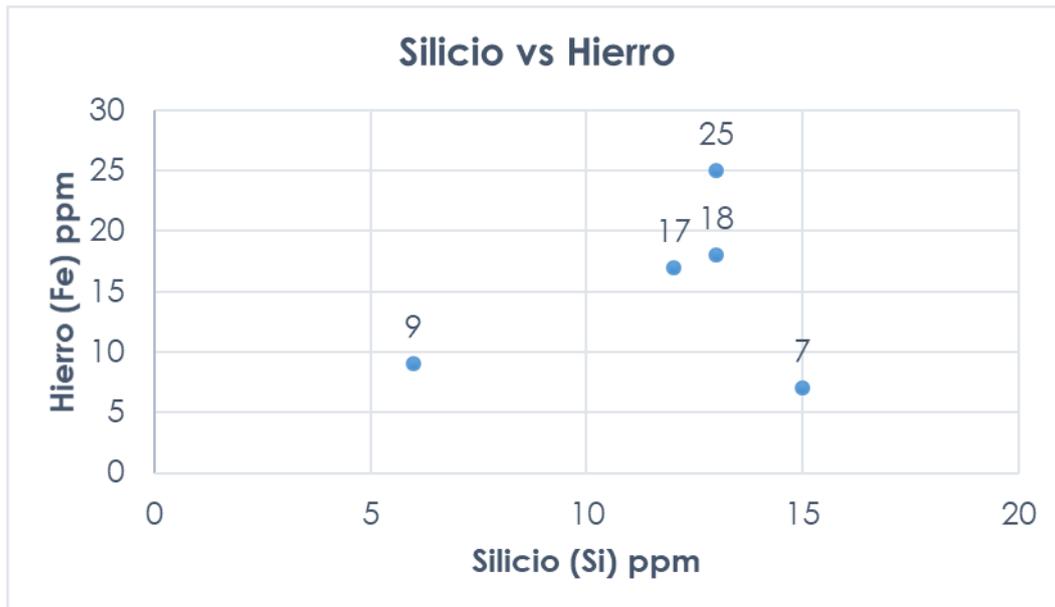
Se observa en las *gráficas 27 y 28*, un relación entre el contenido de silicio y la cantidad de hierro en el análisis de aceite, con el incremento de las ppm de Silicio se ve un incremento en las ppm de Hierro, sin embargo podemos observar algunos valores que se salen de lo previsto como por ejemplo en la *gráfica 27* podemos ver que para 8 ppm de silicio se presentó 20 ppm de Hierro siendo este el valor más alto, esto se debe a que influyen otros factores como lo son el tamaño de la partícula de Silicio y otros contaminantes que generan abrasión, por otra parte en la *gráfica 28* podemos ver que se presentó un valor de 15 ppm de Silicio y 7 ppm de Hierro siendo el valor mínimo, esto puede ser causado por el tamaño de la partícula de Silicio como se expresó anteriormente, para determinar esto es necesario de un análisis donde se incluya el conteo de partículas.



**Gráfica 26. Referencia Silicio vs Hierro.** Fuente: (Martinez, 2005).

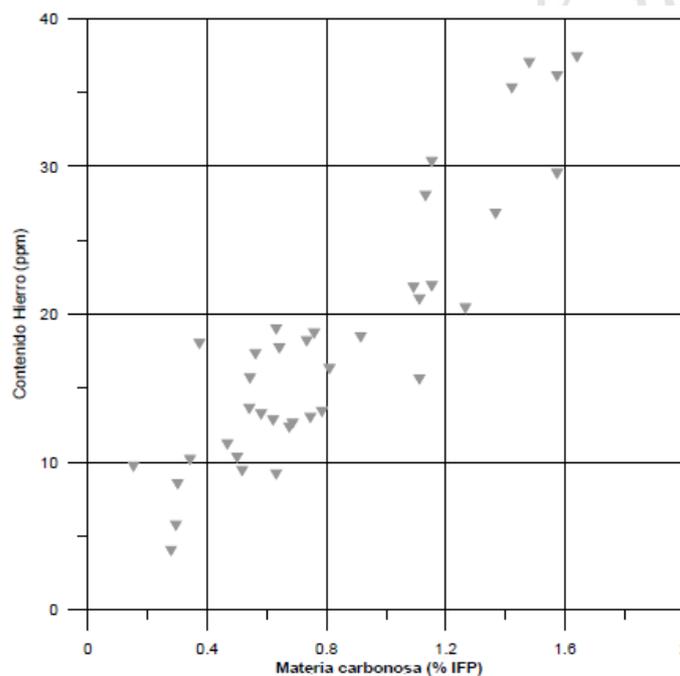


**Gráfica 27. Silicio vs Hierro-móvil 2448.** Fuente: elaboración propia.

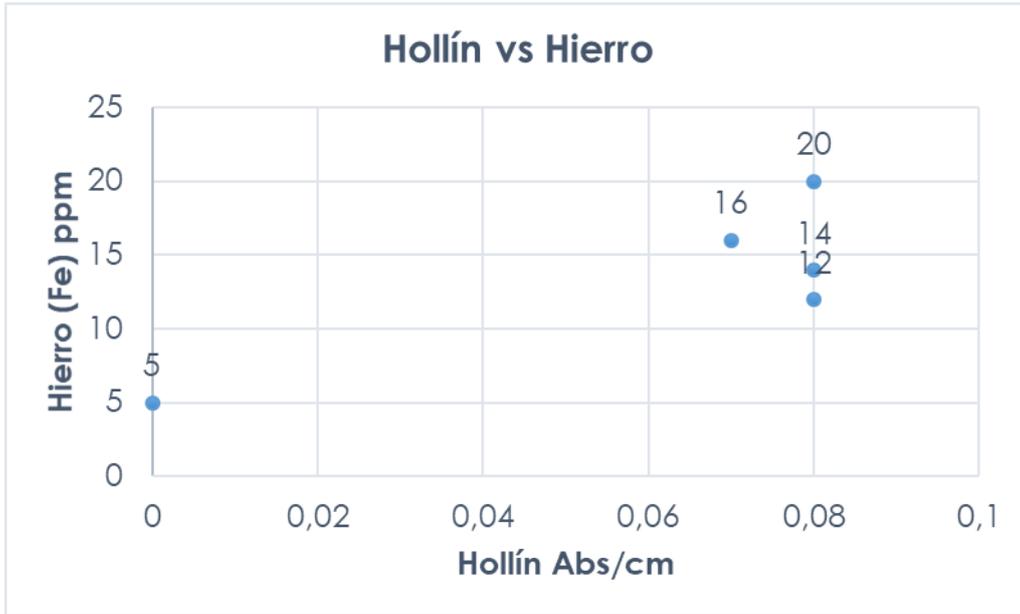


**Gráfica 28. Silicio vs Hierro-móvil 2397.** Fuente: elaboración propia.

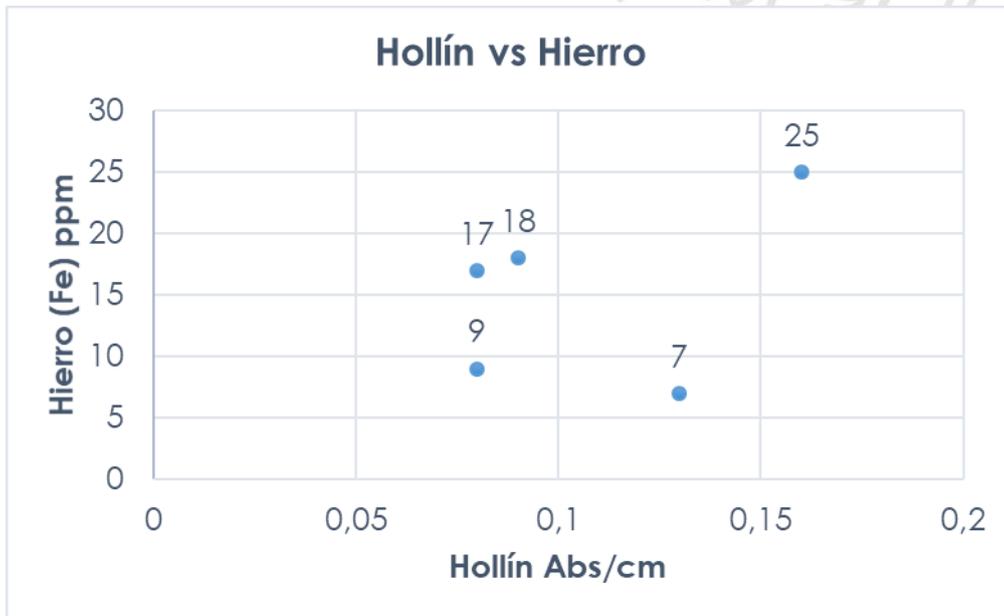
Otro de los factores que influye en el aumento de Hierro es el Hollín, en las *gráficas 21 y 22* se ve como el aumento de hollín genera un aumento de las ppm de Hierro. Para la móvil 2448 se puede percibir que en el mínimo de Silicio y de Hollín se presenta el mínimo de Hierro, como también el aumento de Silicio y Hollín conlleva un aumento de Hierro *gráfica 23*. En el caso particular de la móvil 2397 uno de los factores más influyentes en el aumento de las ppm de Hierro es el sodio como se ve en la *gráfica 24*, donde el sodio presento valores elevados que incrementaron las ppm de Hierro, siendo el factor más influyente por encima del Hollín y el Silicio.



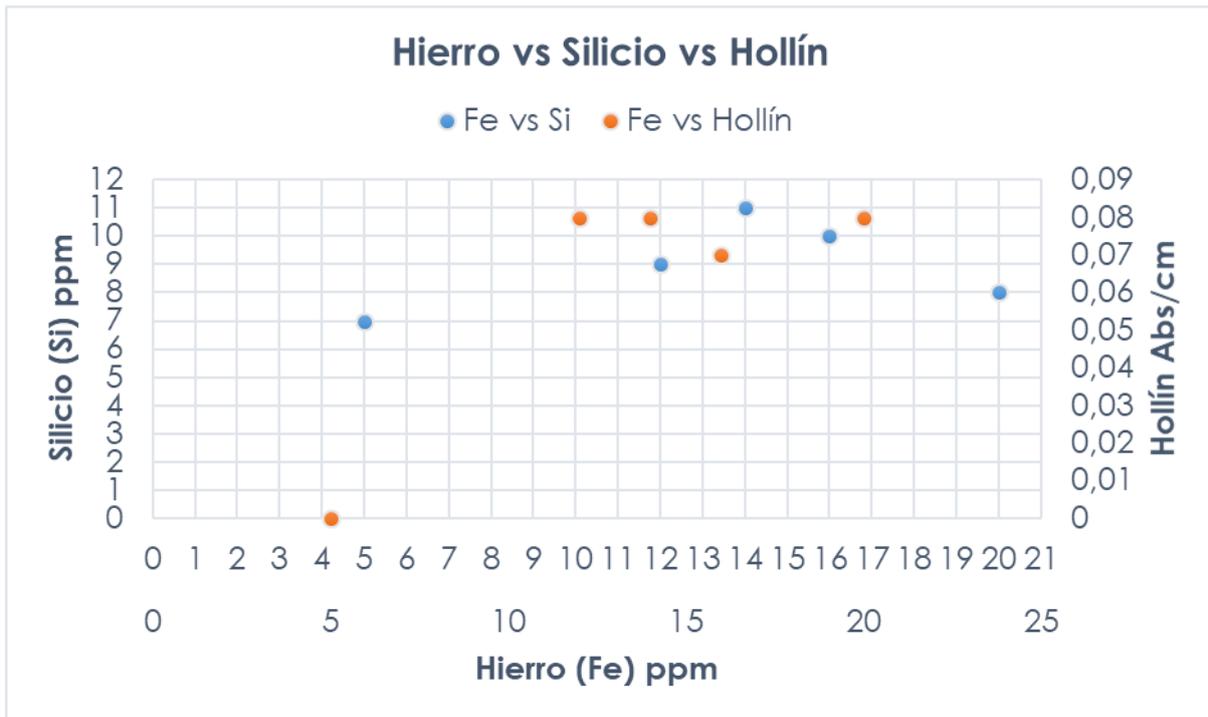
**Gráfica 29. Referencia Hollín vs Hierro.** Fuente: (Martinez, 2005).



Gráfica 30. Hollín vs Hierro-móvil 2448. Fuente: elaboración propia.



Gráfica 31. Hollín vs Hierro-móvil 2397. Fuente: elaboración propia.



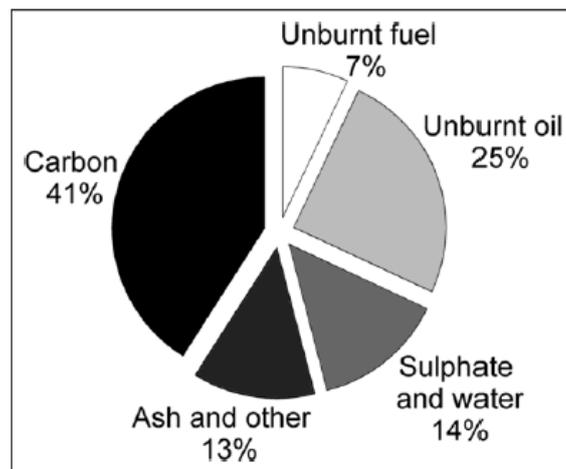
Gráfica 32. Silicio vs Hollín vs Hierro-móvil 2448. Fuente: elaboración propia.



Gráfica 33. Hierro vs Sodio. Fuente: elaboración propia.

## Correlación entre el análisis de aceite y el material particulado en los gases de escape

Siguiendo con lo descrito por (Petter Tornehed, 2012) el modelo se basa principalmente en tres submodelos que describen las partículas de hidrocarburos, hollín y sulfatos, estos submodelos fueron desarrollados a partir de una revisión bibliográfica. Para el desarrollo de estos modelos no se tuvieron en cuenta sistemas de postratamiento de gases de escape, como los son filtros de partículas. Los modelos descritos a continuación se enfocaron en cumplir con la norma de emisiones Euro 5.



Gráfica 34. Composición material Particulado. Fuente: (Petter, 2008).

### Emisiones de partículas de hidrocarburos

Las emisiones provenientes de hidrocarburos suspendidos en el aceite lubricante, se relacionan con el consumo de aceite y un factor de supervivencia del aceite  $SR$ , la medición de este factor lo describe con mayor claridad (Shore, 1988). Este modelo descrito por (Essing G, 1990), establece las siguientes relaciones:

$$PM_{oil,HC} = Oil\ consumption * SR_{HC}$$

Ecuación 1. Emisiones de partículas provenientes de hidrocarburos disueltos en el aceite lubricante. Fuente: (Essing G, 1990)

- $PM_{oil,HC}$  = Material particulado proveniente de los hidrocarburos suspendidos en el aceite.
- $Oil\ consumption$  = Consumo de aceite en el cilindro.
- $SR_{HC}$  = Factor de supervivencia.

## Emisiones de partículas por contenido de cenizas

Las emisiones de partículas provenientes de cenizas suspendidas en el aceite, se atribuyen metales de desgaste, aditivos hechos con base metálica y corrosión en el motor. Este modelo estableció mediante la experimentación qué, un porcentaje bajo de cenizas en el aceite lubricante es precursor directo de una disminución de emisión de material particulado. (Givens WA, 2003) estableció una relación entre el consumo de aceite y el contenido de cenizas en el mismo.

$$PM_{oil,ash} = Oil\ Consumption * Oil\ ash\ content * TR_{oil,ash}$$

**Ecuación 2. Emisiones de partículas provenientes de cenizas disueltas en el aceite lubricante.** Fuente: (Givens WA, 2003).

- $PM_{oil,ash}$  = Material particulado proveniente de las cenizas suspendidas en el aceite.
- $Oil\ consumption$  = Consumo de aceite en el cilindro.
- $Oil\ ash\ content$  = Contenido de cenizas en el aceite lubricante.
- $TR_{oil,ash}$  = Tasa de transferencia de cenizas.

## Emisiones de partículas por contenido sulfato

Las emisiones provenientes del azufre contenido en el aceite lubricante, la formación de óxidos de azufre y más en específico el ácido sulfúrico el cual reacciona con el agua al ser higroscópico, por lo que el agua de esta forma contribuye al peso del material particulado, de acuerdo a lo anterior (Petter, 2009) establece la siguiente relación:

$$PM_{oil,sulphur+H2O} = Oil\ consumption * Oil\ sulphur\ content * TR_{oil,sulphur}$$

**Ecuación 3. Emisiones de partículas provenientes de sulfatos disueltos en el aceite lubricante.** Fuente: (Petter, 2009).

- $PM_{oil,sulphur+H2O}$  = Material particulado proveniente de los sulfuros suspendidos en el aceite.
- $Oil\ consumption$  = Consumo de aceite en el cilindro.
- $Oil\ sulphur\ content$  = contenido de sulfuro en el aceite lubricante
- $TR_{oil,sulphur}$  = Tasa de transferencia de sulfuro.

Las emisiones totales partículas provenientes del aceite lubricante es la suma de los modelos

$$PM_{oil} = PM_{oil,HC} + PM_{oil,ash} + PM_{oil,sulphates+H2O}$$

**Ecuación 4. Emisiones de partículas totales provenientes del aceite lubricante.**

Fuente: (Petter, 2008).

## Resultados Obtenidos para el sistema de indexación y resúmenes Scopus.

**Tabla 15. Resultados obtenidos primer algoritmo.** Fuente: elaboración propia.

Nombre del artículo	Autores	Revista	Año de publicación	Número de citas
A comparative experimental study on the diagnostic and prognostic capabilities of acoustics emission, vibration and spectrometric oil analysis for spur gears	Tan, C.K., Irving, P., Mba, D.	Mechanical Systems and Signal Processing	2007	201
A model to predict the residual life of aircraft engines based upon oil analysis data	Wang, W., Zhang, W.	Naval Research Logistics	2005	92
Analytical approach to wear rate determination for internal combustion engine condition monitoring based on oil analysis	Macián, V., Tormos, B., Olmeda, P., Montoro, L.	Tribology International	2003	86
Low-cost condition monitoring sensor for used oil analysis	Raadnui, S., Kleesuwana, S.	Wear	2005	65
Performance, emissions and lubricant oil analysis of diesel engine running on emulsion fuel	Hasannuddin, A.K., Wira, J.Y., Sarah, S., Ahmad, M.I., Azrin, M.A.	Energy Conversion and Management	2016	45
A case study of condition based maintenance modelling based upon the oil analysis data of marine diesel engines using stochastic filtering	Wang, W., Hussin, B., Jefferis, T.	International Journal of Production Economics	2012	44
Thermogravimetric analysis of carbon black and engine soot - Towards a more robust oil analysis method	Bredin, A., Larcher, A.V., Mullins, B.J.	Tribology International	2011	27
Detailed state of the art review for the different online/inline Oil analysis techniques in context of wind turbine gearboxes	Hamilton, A., Quail, F.	Journal of Tribology	2011	26
Ferrography applied to diesel engine oil analysis	Jones, M.H.	Wear	1979	26
An integrated on-line oil analysis method for condition monitoring	Yin, Y., Wang, W., Yan, X., Xiao, H., Wang, C.	Measurement Science and Technology	2003	21

**Tabla 16. Resultados obtenidos tercer algoritmo.** Fuente: elaboración propia.

Nombre del artículo	Autores	Revista	Año de publicación	Número de citas
Optimization of FOME (fish oil methyl esters) blend and EGR (exhaust gas recirculation) for simultaneous control of NOx and particulate matter emissions in diesel engines	Bhaskar, K., Nagarajan, G., Sampath, S.	Energy	2013	79
Chemical properties of aircraft engine particulate exhaust emissions	Onasch, T.B., Jayne, J.T., Herndon, S., Phil Mortimer, I., Anderson, B.E.	Journal of Propulsion and Power	2009	70
Particulate matter in marine diesel engines exhausts: Emissions and control strategies	Di Natale, F., Carotenuto, C.	Transportation Research Part D: Transport and Environment	2015	64
Characterization of exhaust particulate emissions from a spark ignition engine	Graskow, B.R., Kittelson, D.B., Abdul-Khalek, I.S., Ahmadi, M.R., Morris, J.E.	SAE Technical Papers	1998	60
Combining biodiesel and exhaust gas recirculation for reduction in NOx and particulate emissions	Muncrief, R.L., Rooks, C.W., Cruz, M., Harold, M.P.	Energy and Fuels	2008	50
Overview of the european "particulates" project on the characterization of exhaust particulate emissions from road vehicles: Results for heavy duty engines	Thompson, N., Ntziachristos, L., Samaras, Z., Hausberger, S., Sams, T.	SAE Technical Papers	2004	49
Study of particulate matter and gaseous emissions in gasoline direct injection engine using on-board exhaust gas fuel reforming	Bogarra, M., Herreros, J.M., Tsolakis, A., York, A.P.E., Millington, P.J.	Applied Energy	2016	43
Effect of Calophyllum Inophyllum biodiesel-diesel blends on combustion, performance, exhaust particulate matter and gaseous emissions in a multi-cylinder diesel engine	How, H.G., Masjuki, H.H., Kalam, M.A., Teoh, Y.H., Chuah, H.G.	Fuel	2018	38
Flame temperature correlation for the effects of exhaust gas recirculation on diesel particulate and NOx emissions	Plee, S.L., Ahmad, T., Myers, J.P.	SAE Technical Papers	1981	37
Detailed analysis of diesel vehicle exhaust emissions: Nitrogen oxides, hydrocarbons and particulate size distributions	Yamada, H., Misawa, K., Suzuki, D., Fujii, M., Tanaka, K.	Proceedings of the Combustion Institute	2011	36

## Conclusiones

Se realizó una investigación que permitió encontrar un modelo el cual predice las emisiones de material particulado a partir del consumo de aceite y componentes del mismo. El modelo se divide en tres submodelos, que describen los hidrocarburos, las cenizas y los sulfatos con agua contenidos en el aceite. Los resultados de estos submodelos indican que el aceite contribuye de manera sustancial a la emisión de material particulado, por esta razón se concluye que una forma eficaz de minimizar las emisiones de material particulado es reducir el consumo de aceite en los cilindros del motor.

Se estableció una nueva estrategia para la toma de muestras, la cual sigue de las recomendaciones establecidas por el consejo internacional de motores de combustión (CIMAC). Se evidenció un claro cambio en los resultados obtenidos para el método propuesto con respecto al método tradicional, esta diferencia establece un aumento de confiabilidad en los resultados obtenidos; Se propone incluir en el análisis de aceite variables como son; Total Base Number (TBN), Particles quantifier index (PQI) y punto de inflamación, estas nuevas variables permiten determinar de manera más precisa el estado del aceite lubricante y por ende del motor.

Se presentan correlaciones típicas y recomendadas para el análisis de aceite, entre los diferentes valores obtenidos, estableciendo comportamientos típicos y atípicos de la viscosidad, además como diversos factores afectan directamente la viscosidad del aceite como lo son: las diluciones de combustible, hollín, nitración y oxidación; En ello se evidenció como el sodio y el hollín influyen también en la abrasión del motor.

## Referencias

- Barnes, N. M. (2001). Water: the forgotten contaminant. *Practicing Oil Analysis Magazine*.
- Botero, C. G. (2016). *Plan de acción indicativo de eficiencia energética 2017-2022*. Bogotá: UPME.
- Calleja, D. G. (2008). *Motores Térmicos y sus sistemas auxiliares*. Madrid: Paraninfo.
- CIMAC. (2011). *Guía de interpretación del análisis del aceite de motor usado*. CIMAC.
- Essing G, K. H. (1990). Diesel engine emissions reduction: the benefits of low oil consumption design. *SAE*.
- Givens WA, B. W. (2003). Lube formulation effects on transfer of elements to exhaust aftertreatment system components. *SAE*.
- Isuzu. (s.f.). *Workshop manual 2008/2009MY N series 4JJ1 model*.
- Martinez, B. T. (2005). *Diagnóstico de motores Diesel mediante el análisis de aceite*. Valencia: Riverté.
- Mingo, Á. B. (Julio 2016). *Ánalisis de lubricación termo-elastohidrodinámica y mixta mediante la aplicación de modelos numéricos*. Madrid: UPM.
- Ochoa, R. (2011). *Shell LubeAnalyst*. Obtenido de <https://www.shell.com.co>
- Petter, J. (2008). *Oil-related particle emissions from diesel engines*. Stocolmo: Trita MMK.
- Petter, J. (2009). Impact of sulphur on particulate matter paying special attention to the lubricant: based on a literature review. *Royal Institute of Technology*,.
- Shore, P. R. (1988). Advances in the use of tritium as a radiotracer for oil consumption measurements. *SAE*.
- Soutullo, R. G. (Marzo de 2015). *Teoría de lubricantes*. Obtenido de <https://ingenieromarino.com/lubricantes-tribologia/#:~:text=Se%20define%20la%20viscosidad%20como,del%20propio%20fluido%20a%20fluir>.
- Waldyr Fong Silva, E. Q. (s.f.). *Caracterización físico-química de aceites usados de motores para reciclaje*.

## **Anexos**

**Anexo 1. FURGON CHEVROLET NKR IIIE TRH121-Bomba de vacío**

**Anexo 2. FURGON CHEVROLET NKR IIIE TRH121-Muestra drenada**

**Anexo 3. FURGÓN CHEVROLET NKR IIIE TRN 216-Bomba de vacío**

**Anexo 4. FURGON CHEVROLET NKR IIIE TRN 216-Muestra drenada**

