



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y  
MECÁNICA**

**CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN  
DEL TÍTULO DE INGENIERO AUTOMOTRIZ**

**TEMA: ANÁLISIS TRIBOLÓGICO DE LA UTILIZACIÓN DEL  
ACEITE PDV DE PETROECUADOR GRADO SAE 15W40  
PARA DETERMINAR EL RENDIMIENTO DEL MOTOR DE LA  
VOLQUETA MACK GU813E PERTENECIENTE AL CUERPO  
DE INGENIEROS DEL EJÉRCITO**

**AUTOR: GEOVANNY ALEXANDER ALTAMIRANO LEÓN**

**DIRECTOR: ING. LEONIDAS QUIROZ**

**LATACUNGA**

**2017**



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y  
MECÁNICA  
CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**

**CERTIFICACIÓN**

Certifico que el trabajo de titulación, **“ANÁLISIS TRIBOLÓGICO DE LA UTILIZACIÓN DEL ACEITE PDV DE PETROECUADOR GRADO SAE 15W40 PARA DETERMINAR EL RENDIMIENTO DEL MOTOR DE LA VOLQUETA MACK GU813E PERTENECIENTE AL CUERPO DE INGENIEROS DEL EJÉRCITO”** realizado por el señor **GEOVANNY ALEXANDER ALTAMIRANO LEÓN**, ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software anti-plagio, el mismo cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto me permito acreditarlo y autorizar al señor **GEOVANNY ALEXANDER ALTAMIRANO LEÓN** para que lo sustente públicamente.

Latacunga, 22 de febrero del 2017

  
\_\_\_\_\_  
ING. LEONIDAS QUIROZ  
DIRECTOR





**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y  
MECÁNICA  
CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**

**AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD**

Yo, **GEOVANNY ALEXANDER ALTAMIRANO LEÓN**, con cédula de identidad N° 171622891-9 declaro que este trabajo de titulación ***“ANÁLISIS TRIBOLÓGICO DE LA UTILIZACIÓN DEL ACEITE PDV DE PETROECUADOR GRADO SAE 15W40 PARA DETERMINAR EL RENDIMIENTO DEL MOTOR DE LA VOLQUETA MACK GU813E PERTENECIENTE AL CUERPO DE INGENIEROS DEL EJÉRCITO”*** ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas.

Consecuentemente declaro que este trabajo es de mi autoría, en virtud de ello me declaro responsable del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

**Latacunga, 22 de febrero del 2017**

---

**GEOVANNY ALEXANDER ALTAMIRANO LEÓN**

C.C.: 1716228919



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y  
MECÁNICA  
CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**

**AUTORIZACIÓN**

Yo, **GEOVANNY ALEXANDER ALTAMIRANO LEÓN**, declaro a la Universidad de las Fuerzas armadas ESPE publicar en la biblioteca virtual de la institución el presente trabajo de titulación **“ANÁLISIS TRIBOLÓGICO DE LA UTILIZACIÓN DEL ACEITE PDV DE PETROECUADOR GRADO SAE 15W40 PARA DETERMINAR EL RENDIMIENTO DEL MOTOR DE LA VOLQUETA MACK GU813E PERTENECIENTE AL CUERPO DE INGENIEROS DEL EJÉRCITO”** cuyo contenido, ideas y criterios son de mi autoría y responsabilidad.

**Latacunga, 22 de febrero del 2017**

---

**GEOVANNY ALEXANDER ALTAMIRANO LEÓN**

C.C.: 1716228919

## DEDICATORIA

En primer lugar quiero dar gracias a Dios por concederme una familia maravillosa que a pesar de haber tenido muchos momentos de inmenso dolor que la vida nos ha puesto, seguimos en pie de lucha tratando siempre de dar lo mejor de nosotros, precautelando sobre todas las cosas el permanecer juntos aun cuando las adversidades e inconvenientes muestren lo contrario.

A mis padres Jorge Giovanni Altamirano Cueva y Alba Rosario León Albuja, ejemplos de lucha, perseverancia, fortaleza, bondad, honradez y guías a lo largo de toda mi vida, les agradezco por su apoyo incondicional brindado todos los años de mi existencia; además, por haber sido ese pilar fundamental, les digo gracias de todo corazón por ser mis consejeros y mi motivación para cada día seguir esforzándome mucho más por una meta y un anhelo que me propuse hace años cuando decidí convertirme en un profesional. Quiero dedicarles este logro tan significativo, ya que sin ellos hubiera perdido las riendas que guían mi vida.

A mis hermanos Alba Dayana y Andrew Daniel Altamirano y a mi sobrino José David Basantes con quienes he compartido momentos de alegría, tristeza, logros y sueños, les doy gracias por alentarme y por demostrarme que son una gran razón para seguir luchando y esforzándome día a día.

A mis jefes William Giovanni Yáñez y Rita Consuelo Tayupanta, les doy gracias y les dedico mucho este gran logro ya que en momentos de mucha incertidumbre y tragedia supieron brindarme la ayuda que muchas personas no le hubieran dado a un extraño.

**Geovanny.**

## AGRADECIMIENTO

A la Universidad de las Fuerzas Armadas “ESPE-L”, y a la Carrera de Ingeniería Automotriz por ser parte de mi formación ética y profesional.

A mi padres, hermanos y sobrino quienes fueron la fuente de mi motivación durante todo este proceso de formación, a ellos que me brindaron su apoyo incondicional de principio a fin en esta gran travesía emprendida y que a pesar de las circunstancias impuestas en mi vida fueron el pilar fundamental para mi constancia y perseverancia, a ellos a quienes me faltarían las palabras para agradecerles por todos sus deseos.

A los docentes de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE-L, guías y mentores a lo largo de mi formación académica; a mis grandes amigos, Carlos Esmeraldas, José Hernández, Elizabeth Morales, Dario Sisalema y Fernando Cepeda compañeros de lucha en este proceso de vida universitaria.

Al Ing. Leonidas Quiroz (Director y amigo), por compartir sus conocimientos, experiencias y alentarme en este camino de retos y por ser el guía en este proyecto y ser parte de este logro.

Al Sr. Victor Rubio (amigo), por influir y motivarme con anhelos de obtener un futuro más próspero y alentador.

**Geovanny.**

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

<b>CARÁTULA.....</b>	<b>i</b>
<b>CERTIFICACIÓN.....</b>	<b>ii</b>
<b>AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD.....</b>	<b>iii</b>
<b>AUTORIZACIÓN.....</b>	<b>iv</b>
<b>DEDICATORIA.....</b>	<b>v</b>
<b>AGRADECIMIENTO.....</b>	<b>vi</b>
<b>ÍNDICE DE CONTENIDOS.....</b>	<b>vii</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS.....</b>	<b>xi</b>
<b>ÍNDICE DE ECUACIONES.....</b>	<b>xiii</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>xiv</b>
<b>RESUMEN.....</b>	<b>xvi</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>xvii</b>

### CAPÍTULO I

<b>1. GENERALIDADES.....</b>	<b>1</b>
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Planteamiento del problema.....	2
1.3. Descripción resumida del proyecto.....	2
1.4. Justificación e importancia.....	3
1.5. Objetivos del proyecto.....	4
1.5.1. Objetivo general.....	4
1.5.2. Objetivos específicos.....	4
1.6. Metas.....	5
1.7. Hipótesis.....	5
1.8. Variables de la investigación.....	5

### CAPÍTULO II

<b>2. ESTADO DE LA CIENCIA.....</b>	<b>8</b>
2.1. Introducción Tribología.....	8
2.1.1. Fricción.....	8
2.1.2. Desgaste.....	10
2.1.3. Lubricación.....	12
2.2. Factores de la degradación de aceites.....	15
2.2.1. Degradación de aceite lubricante.....	15

2.2.2. Oxidación.....	16
2.2.3. Hidrólisis.....	16
2.2.4. Degradación Térmica.....	17
2.3. Lubricantes.....	17
2.3.1. Funciones de los lubricantes .....	17
2.3.2. Tipos de Lubricantes.....	18
2.3.3. Clasificación de los lubricantes .....	18
2.4. Aditivos de los lubricantes .....	26
2.5. Viscosidad.....	27
2.5.1. Viscosidad dinámica .....	27
2.5.2. Viscosidad cinemática .....	28
2.5.3. Importancia de la viscosidad .....	30
2.6. TBN (Número Total Base) y TAN (Número Total Ácido) .....	30
2.6.1. TBN (Número Total Base) .....	30
2.6.2. TAN (Número Total Ácido).....	32
2.7. Factores de contaminación del aceite .....	32
2.8. Manipulación y almacenamiento de aceites lubricantes.....	33
2.9. Aceites usados .....	34
2.10. Reciclaje del aceite usado .....	35
2.11. Técnicas de muestreo.....	36
2.12. Frecuencias de muestreo.....	38
2.13. Ley de Stokes .....	39

### **CAPÍTULO III**

<b>3. ANÁLISIS DEL LUBRICANTE Y VEHÍCULO UTILIZADO .....</b>	<b>41</b>
3.1. Antecedentes del lubricante utilizado.....	41
3.2. Análisis del lubricante PDV de PETROECUADOR grado SAE 15W40 CI4.....	43
3.3. Especificaciones técnicas del vehículo .....	44
3.4. Estado técnico del vehículo.....	45
3.5. Prueba del Número Total Base (TBN) .....	45
3.6. Prueba conteo de partículas .....	46
3.7. Prueba de la viscosidad .....	47
3.8. Prueba de la condición de aceite.....	48
3.9. Análisis tribológico.....	49

**CAPÍTULO IV**

<b>4. ANÁLISIS DE RESULTADOS .....</b>	<b>62</b>
4.1. Resultados de las muestras obtenidas del aceite usado PDV de PETROECUADOR (PETROCOMERCIAL) grado SAE 15W40...	62
4.1.1. Resultado del TBN (Número Total Base) .....	62
4.1.2. Resultado del Conteo de partículas .....	63
4.1.3. Resultado de la Viscosidad .....	64
4.1.4. Resultados de la Condición del aceite .....	65
4.2. Síntesis de resultados de las muestras obtenidas.....	67
4.3. Cálculo experimental de la Ley de Stokes .....	80

**CAPÍTULO V**

<b>5. MARCO ADMINISTRATIVO .....</b>	<b>84</b>
5.1 Recursos .....	84
5.1.1 Recursos humanos .....	84
5.1.2 Recursos tecnológicos .....	85
5.1.3 Recursos materiales .....	85
5.2 Gastos del proyecto .....	87
5.3 Cronograma .....	88

<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>89</b>
---------------------------	-----------

<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>92</b>
------------------------------	-----------

<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>94</b>
---	-----------

<b>TEXTOS .....</b>	<b>94</b>
---------------------	-----------

<b>ARTÍCULOS Y NORMATIVAS .....</b>	<b>96</b>
-------------------------------------	-----------

<b>NETGRAFÍA.....</b>	<b>98</b>
-----------------------	-----------

<b>ANEXOS .....</b>	<b>103</b>
---------------------	------------

A. Ficha de revisión técnica de la volqueta MACK GU813E	
B. Aceite Nuevo código R440-46099-0038	
C. Aceite Usado 75, 130 y 203 horas de funcionamiento del motor código R440-46099-0039, R440-46099-0040 y R440-46118-0049 respectivamente.	

- D. Aceite Usado 301 horas de funcionamiento del motor código R440-46165-0078
- E. Aceite Usado 1500, 2200, 3013 y 5007 kilómetros de recorrido código R440-46118-0049, R440-46165-0078, R440-46197-0063 y R440-46251-0021 respectivamente.
- F. Norma ASTM E-2412
- G. Norma ASTM D-974
- H. Norma ASTM D-5185
- I. Norma ASTM D-445

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Operacionalización de la variable independiente.....	6
<b>Tabla 2.</b> Operacionalización de la variable dependiente.....	7
<b>Tabla 3.</b> Coeficientes de fricción de líquidos lubricantes .....	9
<b>Tabla 4.</b> Valores permisibles elementos de desgaste.....	11
<b>Tabla 5.</b> Posibles fuentes de desgaste .....	12
<b>Tabla 6.</b> Límites de precaución y críticos de la condición del aceite .....	15
<b>Tabla 7.</b> Factores de la degradación de aceite .....	16
<b>Tabla 8.</b> Aceites monogrados.....	19
<b>Tabla 9.</b> Clasificación SAE J300.....	21
<b>Tabla 10.</b> Clasificación API para motores diésel.....	22
<b>Tabla 11.</b> Categoría o serie C.....	24
<b>Tabla 12.</b> Categoría o serie E.....	25
<b>Tabla 13.</b> ACEA categoría E-2004.....	25
<b>Tabla 14.</b> Límites críticos y de precaución del pack de aditivos .....	26
<b>Tabla 15.</b> Límites crítico y de precaución de la viscosidad.....	29
<b>Tabla 16.</b> Grados de viscosidad ISO según DIN 51519 .....	29
<b>Tabla 17.</b> Límites de precaución y críticos del aceite lubricante del TBN.....	31
<b>Tabla 18.</b> Características del aceite lubricante PDV .....	42
<b>Tabla 19.</b> Línea Base del TBN aceite nuevo .....	42
<b>Tabla 20.</b> Conteo de partículas aceite nuevo.....	43
<b>Tabla 21.</b> Viscosidad aceite nuevo .....	43
<b>Tabla 22.</b> Condición del aceite nuevo .....	43
<b>Tabla 23.</b> Especificaciones técnicas MACK GU813E .....	44
<b>Tabla 24.</b> Elementos de desgaste.....	46
<b>Tabla 25.</b> Resultados del TBN del aceite usado por horas de operación .....	62
<b>Tabla 26.</b> Resultados del TBN del aceite usado por kilometraje recorrido .....	62
<b>Tabla 27.</b> Resultado conteo de partículas del aceite usado horas de operación .....	63
<b>Tabla 28.</b> Resultado conteo de partículas del aceite usado por kilometraje .....	64
<b>Tabla 29.</b> Resultados de la viscosidad del aceite usado por horas de operación .....	64
<b>Tabla 30.</b> Resultados de la viscosidad aceite usado por kilometraje recorrido .....	65

<b>Tabla 31.</b> Resultado condición del aceite usado por horas de operación.....	65
<b>Tabla 32.</b> Resultado condición del aceite usado por kilometraje recorrido .....	66
<b>Tabla 33.</b> Resultado contaminantes del aceite usado por horas de operación .....	66
<b>Tabla 34.</b> Resultado contaminantes del aceite usado por kilometraje recorrido ....	67
<b>Tabla 35.</b> Valores permisibles conteo de partículas aceite usado .....	68
<b>Tabla 36.</b> Límites críticos y precaución pack de aditivos del aceite usado horas ..	69
<b>Tabla 37.</b> Límites de la condición del aceite usado por horas de operación.....	70
<b>Tabla 38.</b> Límites viscosidad cinemática del aceite usado horas de operación.....	71
<b>Tabla 39.</b> Límites TBN del aceite usado por horas de operación del motor.....	72
<b>Tabla 40.</b> Valores permisibles conteo de partículas aceite usado por kilometraje ..	73
<b>Tabla 41.</b> Límites pack de aditivos del aceite usado por kilometraje recorrido .....	74
<b>Tabla 42.</b> Límites condición del aceite usado por kilometraje recorrido .....	75
<b>Tabla 43.</b> Límites viscosidad del aceite usado por kilometraje recorrido .....	76
<b>Tabla 44.</b> Límites críticos y precaución TBN aceite usado por kilometraje.....	77
<b>Tabla 45.</b> Tabla de valores de la tendencia .....	78
<b>Tabla 46.</b> Resumen cálculos .....	83
<b>Tabla 47.</b> Costo de recursos tecnológicos.....	85
<b>Tabla 48.</b> Costo recurso material .....	86
<b>Tabla 49.</b> Costo total neto.....	87

## ÍNDICE DE ECUACIONES

<b>Ecuación 1.</b> Fuerza de fricción .....	9
<b>Ecuación 2.</b> Efecto de la temperatura en la viscosidad.....	13
<b>Ecuación 3.</b> Efecto de la presión en la viscosidad .....	14
<b>Ecuación 4.</b> Película del lubricante.....	14
<b>Ecuación 5.</b> Límite de precaución superior para la condición de aceite .....	15
<b>Ecuación 6.</b> Límite crítico superior para la condición del aceite .....	15
<b>Ecuación 7.</b> Límite de precaución superior para el pack de aditivos.....	26
<b>Ecuación 8.</b> Límite crítico superior para el pack de aditivos.....	26
<b>Ecuación 9.</b> Viscosidad Dinámica .....	27
<b>Ecuación 10.</b> Análisis dimensional viscosidad dinámica.....	28
<b>Ecuación 11.</b> Viscosidad Cinemática .....	28
<b>Ecuación 12.</b> Análisis dimensional de la viscosidad cinemática .....	28
<b>Ecuación 13.</b> Límite de precaución inferior para la viscosidad .....	29
<b>Ecuación 14.</b> Límite de precaución superior para la viscosidad .....	29
<b>Ecuación 15.</b> Límite crítico inferior para la viscosidad .....	29
<b>Ecuación 16.</b> Límite crítico superior para la viscosidad .....	29
<b>Ecuación 17.</b> Límite de precaución inferior para el TBN .....	31
<b>Ecuación 18.</b> Límite crítico inferior para el TBN .....	31
<b>Ecuación 19.</b> Unidades del TBN .....	32
<b>Ecuación 20.</b> Ley de Stokes.....	40

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Nivel de TBN según el contenido de azufre del combustible .....	31
<b>Figura 2.</b> Técnica vampiro.....	36
<b>Figura 3.</b> Altura recomendada de la manguera.....	36
<b>Figura 4.</b> Extracción del aceite lubricante .....	37
<b>Figura 5.</b> Técnica del acople rápido.....	37
<b>Figura 6.</b> Titrador Potenciométrico Analizador de TBN o BN.....	45
<b>Figura 7.</b> Espectrómetro.....	46
<b>Figura 8.</b> Viscosímetro CANNON .....	47
<b>Figura 9.</b> Espectrómetro de infrarrojo.....	48
<b>Figura 10.</b> Elementos de Desgaste Cu, Fe, Cr, Al vs Horas de operación .....	50
<b>Figura 11.</b> Elementos de Desgaste Pb, Sn, Si, Na vs Horas de operación .....	51
<b>Figura 12.</b> Elementos de Desgaste K, Mo, Ni, V vs Horas de operación .....	52
<b>Figura 13.</b> Elementos de Desgaste "Aditivos" vs Horas de operación .....	52
<b>Figura 14.</b> Hollín (ST) vs Horas de operación del motor .....	53
<b>Figura 15.</b> Agua (W) vs Horas de operación del motor.....	53
<b>Figura 16.</b> Anticongelante (A) vs Horas de operación del motor .....	53
<b>Figura 17.</b> Combustible (F) vs Horas de operación del motor .....	54
<b>Figura 18.</b> Oxidación (OXI) vs Horas de operación del motor .....	54
<b>Figura 19.</b> Nitración (NIT) vs Horas de operación del motor .....	54
<b>Figura 20.</b> Sulfatación (SUL) vs Horas de operación del motor.....	55
<b>Figura 21.</b> Viscosidad vs Horas de Operación del motor .....	55
<b>Figura 22.</b> Número Total Base (TBN) vs Horas de Operación del motor.....	55
<b>Figura 23.</b> Elementos de Desgaste Cu, Fe, Cr, Al vs Kilometraje recorrido.....	56
<b>Figura 24.</b> Elementos de Desgaste Pb, Sn, Si, Na vs Kilometraje recorrido .....	57
<b>Figura 25.</b> Elementos de Desgaste K, Mo, Ni, V vs Kilometraje recorrido .....	57
<b>Figura 26.</b> Elementos de Desgaste "Aditivos" vs Kilometraje recorrido .....	58
<b>Figura 27.</b> Hollín (ST) vs Kilometraje recorrido .....	58
<b>Figura 28.</b> Agua (W) vs Kilometraje recorrido .....	59
<b>Figura 29.</b> Anticongelante (A) vs Kilometraje recorrido.....	59
<b>Figura 30.</b> Combustible (F) vs Kilometraje recorrido .....	59
<b>Figura 31.</b> Oxidación (OXI) vs Kilometraje recorrido .....	60

<b>Figura 32.</b> Nitración (NIT) vs Kilometraje recorrido.....	60
<b>Figura 33.</b> Sulfatación (SUL) vs Kilometraje recorrido .....	60
<b>Figura 34.</b> Viscosidad vs Kilometraje recorrido.....	61
<b>Figura 35.</b> Número Total Base (TBN) vs Kilometraje recorrido .....	61
<b>Figura 36.</b> Tendencia horas de operación en función Viscosidad cinemática .....	78
<b>Figura 37.</b> Tendencia viscosidad cinemática en función horas de operación .....	79

## RESUMEN

El presente trabajo de titulación, da a conocer como el aceite lubricante de motor diésel PDV grado SAE 15W40 API CI-4 de PETROCOMERCIAL, se comporta a lo largo de su vida útil, tomando siempre en consideración los intervalos y rangos de funcionamiento considerando las horas de operación del motor y el kilometraje recorrido por el automotor; el lubricante se recolectó de una volqueta MACK GU813E perteneciente al Cuerpo de Ingenieros del Ejército, al que se analizó las propiedades físico-químicas, se determinó como se ve afectado el lubricante por la acción de procesos como la combustión, las reacciones químicas que se producen internamente, la acumulación de impurezas y hollín. Las pruebas se realizó en los laboratorios de IIASA Caterpillar las muestras recolectadas fueron procesadas de acuerdo a los estándares de calidad. Se analizó el TBN (Número Total Base), el cual es considerado como uno de los factores más relevantes del lubricante; se realizó pruebas de viscosidad para poder determinar su comportamiento; la prueba de la condición del aceite lubricante permitió conocer los parámetros característicos en la degradación del lubricante que son: nitración, sulfatación, oxidación, hollín y el conteo del particulado de elementos, los cuales son el producto del desgaste y fricción de las piezas móviles del motor como son: cigüeñal, cojinetes de biela y bancada, pistones, anillos de pistón, camisas de pistón, entre otros.

### **PALABRAS CLAVE:**

- **DESGASTE DE ELEMENTOS**
- **CONTAMINANTES DEL ACEITE**
- **VISCOSIDAD CINEMÁTICA**
- **LUBRICACIÓN**

## **ABSTRACT**

The present titling work, known as PETROCOMERCIAL SAE 15W40 API CI-4 PDV diesel engine lubricating oil, behaves throughout its useful life, always taking into consideration the intervals and operating ranges considering the hours Engine operation and mileage driven by the automotive; The lubricant was collected from a Mack GU813E dumper belonging to the Army Corps of Engineers, which analyzed the physico-chemical properties, determined how the lubricant is affected by the action of processes such as combustion, chemical reactions that occur Internally, the accumulation of impurities and soot. Testing was performed at Caterpillar IIASA laboratories. The collected samples were processed according to quality standards. The TBN (Total Base Number) was analyzed, which is considered as one of the most relevant factors of the lubricant; Viscosity tests were performed to determine their behavior; The test of the condition of the lubricating oil allowed to know the characteristic parameters in the degradation of the lubricant that are: nitration, sulfation, oxidation, soot and the particulate count of elements, which are the product of the wear and friction of the moving parts of the Engines such as: crankshaft, connecting rod and bench bearings, pistons, piston rings, piston skirts, among others.

### **KEYWORDS:**

- **WEAR OF ELEMENTS**
- **OIL CONTAMINANTS**
- **KINEMATIC VISCOSITY**
- **LUBRICATION**

# CAPÍTULO I

## 1. GENERALIDADES

### 1.1. Antecedentes

En los motores diésel, el sistema de lubricación abarca varias funciones importantes entre ellas se encuentran: reducir el desgaste, lubricar y limpiar las piezas en movimiento. Al producirse desgastes internos debido a la fricción entre las piezas, las partículas pequeñas del material que son desprendidas producidas por la fricción pasan al aceite lubricante; las partículas de mayor tamaño se depositan en el fondo del cárter o quedan atrapadas en el filtro. La cantidad de partículas de los elementos metálicos que quedan en suspensión en el aceite lubricante, debido a la fricción y desgaste de los elementos internos, determinarán si existe un desgaste acelerado o normal del motor. (Viteri & Jaramillo, 2011)

Los motores de combustión interna (MCI), son susceptibles, propensos a fallas y daños en su funcionamiento. Uno de los problemas que afectan a los motores diésel corresponde a un descuido o falta de un adecuado plan de mantenimiento, por exceder el kilometraje, tiempo de vida útil que posee un lubricante y uso de un lubricante que no cumple con las especificaciones requeridas para el motor, por ende pasando por alto los requerimientos propuestos por el fabricante. (EcuRed, 2016)

Actualmente el estudio de la degradación o la contaminación de aceites lubricantes usados son de gran ayuda para los usuarios, debido a que el poder conocer los respectivos parámetros producidos en un análisis físico-químico, se puede llegar a establecer si un motor de combustión interna o un sistema que requiere el uso de lubricante, mantiene un buen margen de vida útil aun para su desempeño y uso.

## **1.2. Planteamiento del problema**

La degradación de aceites lubricantes para motor sufren distintos problemas como la presencia de partículas de polvo o también por el mismo deterioro que posee un lubricante al estar almacenado de manera incorrecta o por tiempos prolongados, además de su afectación en la viscosidad, es por estas circunstancias que se ha determinado la necesidad de realizar un seguimiento mediante el análisis del aceite del motor tomando en cuenta resultados como el TBN (Número Total Base), conteo de partículas por millón, la viscosidad y la condición del aceite PDV de PETROCOMERCIAL grado SAE 15W40 de origen nacional, el cual cumple con los niveles de calidad API (American Petroleum Institute) la CI-4, además de cumplir con los requisitos de las Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN (2030, 2011).

La idea surgió por visión del responsable de este proyecto para poder determinar el grado de afectación o daño que se genera en un aceite lubricante, además de determinar el rendimiento que se generará al realizar una investigación conforme este es aplicado en un vehículo de transporte de carga pesada.

## **1.3. Descripción resumida del proyecto**

El análisis de la degradación de aceite lubricante PDV de PETROCOMERCIAL grado SAE 15W40 permitió establecer el grado de deterioro que sufre el lubricante conforme el tiempo de uso. Teniendo en cuenta las principales pruebas usadas como el TBN (Número Total Base), que determinó la cantidad de reserva alcalina o básica que posee el aceite, además de conocer la concentración de azufre del combustible; el conteo de partículas, factor que permitió conocer el grado de desgaste de los componentes del motor camisas del pistón, rines, cigüeñal, cojinetes, pistones, entre otros; la viscosidad cinemática propiedad fundamental del aceite lubricante con ella se determinó el comportamiento que sufre dicha condición en función a la temperatura de operación y la condición del aceite en donde se analizaron aspectos como la oxidación, nitración, sulfatación,

entre otros parámetros. Con los resultados se realizó un proceso estadístico de control del comportamiento del aceite lubricante de motor de producción ecuatoriano, con el fin de motivar al uso del aceite lubricante nacional, el cual cumple los niveles de calidad API (Instituto Americano del Petróleo) para motores diésel CI-4.

Las pruebas fueron realizadas después de la toma de muestras extraídas de una volqueta MACK GU813E perteneciente al Cuerpo de Ingenieros del Ejército, la cual se encuentra en constante funcionamiento y mediante el análisis físico-químico del lubricante con la ayuda del laboratorio de IIASA Ecuador (CATERPILLAR), se logró obtener resultados fidedignos y acertados referente a los procesos de desgaste y degradación que ocurren en los componentes internos del motor y en el aceite lubricante.

#### **1.4. Justificación e importancia**

Los análisis realizados del lubricante en los laboratorios de IIASA Ecuador (CATERPILLAR), el cual cuenta con certificación tales como: (ISO9001, 2008) (norma que se concentra en la calidad con la que la empresa administra sus productos y servicios), (ISO14001, 2004) (norma que regula el equilibrio entre el rendimiento de una organización y la reducción del impacto en el medio ambiente), (OHSAS18001, 2007) (evalúa la gestión de la seguridad y salud ocupacional) e (ISO/IEC17025, 2005) (normativa que aplica a cualquier tipo de laboratorio de calibración o ensayos, independiente de su tamaño o actividad). Asegurando que el análisis del lubricante que se va a someter a prueba tenga un correcto resultado.

Las principales ventajas que constituye el análisis del aceite de motor es evitar paralizaciones no programadas, ayuda a prevenir fallas, incrementar la vida útil del motor, reducir costos de inventario, mejorar la disponibilidad de los motores, determinar el rendimiento del motor y contribuir con el control de emisiones de los gases de escape evacuados hacia el medio ambiente disminuyendo la contaminación del aire.

## **1.5. Objetivos del proyecto**

### **1.5.1. Objetivo general**

Realizar el análisis físico-químico del aceite PDV de PETROECUADOR (PETROCOMERCIAL) grado SAE 15W40, considerando horas de operación del motor y kilometraje total recorrido de la volqueta MACK GU813E perteneciente al Cuerpo de Ingenieros del Ejército, para determinar el rendimiento del motor.

### **1.5.2. Objetivos específicos**

- Obtener información teórica que sustente el desarrollo del proyecto de investigación, de una manera técnica y científica de fuentes confiables.
- Recolectar muestras del aceite lubricante PDV de PETROECUADOR (PETROCOMERCIAL) grado SAE 15W40 de la volqueta MACK GU813E, en función de horas de operación y kilometraje de recorrido realizado por el vehículo.
- Analizar el (TBN, conteo de partículas, viscosidad y condición del aceite) de cada muestra obtenida del aceite PDV de PETROECUADOR (PETROCOMERCIAL) grado SAE 15W40.
- Determinar las propiedades del aceite PDV de PETROECUADOR (PETROCOMERCIAL) grado SAE 15W40, mediante un conjunto de pruebas (TBN, conteo de partículas, viscosidad y condición del aceite) en el laboratorio de IIASA (Caterpillar).
- Analizar los resultados de las pruebas realizadas al aceite usado, en base a los valores permisibles de cada condición (TBN, conteo de partículas, viscosidad y condición del aceite) establecidas en las tablas obtenidas por CATERPILLAR.

## 1.6. Metas

- Obtener las muestras del aceite PDV de PETROCOMERCIAL grado SAE 15W40, las cuales serán tomadas desde el bidón en el caso del aceite nuevo o del interior del motor de la volqueta MACK GU813E para el lubricante usado, dichas muestras han sido tomadas de acuerdo a los parámetros establecidos siendo en horas de operación del motor o por kilometraje recorrido por el vehículo.
- Realizar el análisis de cada una de las muestras de aceite nuevo y usado obtenidas de la volqueta MACK GU813E en los laboratorios de IIASA Ecuador, ejecutando las siguientes pruebas: TBN, conteo de partículas, viscosidad y condición del aceite.
- Desarrollar tablas de tabulación para identificar los problemas existentes en las pruebas aplicadas al usar el aceite PDV de PETROCOMERCIAL grado SAE 15W40 comparando los valores permisibles y obtenidos en la presente investigación.

## 1.7. Hipótesis

El análisis físico-químico del lubricante PDV de PETROECUADOR (PETROCOMERCIAL) grado SAE 15W40 API CI-4, servirá como eje principal en el determinar el grado de deterioro que puede llegar a sufrir el lubricante de motor, implementando parámetros de recolección rigurosos en función del tiempo de operación del motor y control de recorrido del vehículo para la obtención de las muestras.

## 1.8. Variables de la investigación

### **Variable Independiente:**

Aceite lubricante de motor diésel PDV de PETROECUADOR grado SAE 15W40 API CI-4

**Tabla 1.**  
**Operacionalización de la variable independiente**

Concepto	Categoría	Indicadores	Ítem	Técnicas	Instrumentos
Reduce la fricción, desgaste mediante la prevención del contacto de los elementos internos por medio de la película de lubricante.	SAE 15W40 API CI-4	Viscosidad cinemática	cSt	Cálculos Medición	Prueba de laboratorio Ecuaciones
		Viscosidad dinámica	cP	Cálculos	Ecuaciones
		Índice de viscosidad	cSt/cSt	Cálculos Medición	Prueba de laboratorio Ecuaciones
		Punto de Fluidez	°C	Medición	Termómetro
		Punto de Inflamación	°C	Medición	Termómetro
		Número Total Base	mg KOH/gr	Cálculos Medición	Prueba de laboratorio Ecuaciones
		Densidad relativa Temperatura	°C	Medición	Prueba de laboratorio Ecuaciones

- **Variable Dependiente:**

Análisis físico-químico del lubricante PDV grado SAE 15W40

**Tabla 2.**  
**Operacionalización de la variable dependiente**

Concepto	Categoría	Indicadores	Ítems	Técnicas	Instrumentos
Es el estudio que se hace a todo aquello que funciona por medio de interacciones de la química con el movimiento y todo aquello que es físico.	PDV grado SAE 15W40	Número Total Base	mg KOH/gr	Medición	Titrador potenciométrico
		Viscosidad cinemática	CSt	Medición	Viscosímetro CANNON SAE J300
		Oxidación	Abs/mm ó UFM	Medición	Infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR)
		Nitración	Abs/mm ó UFM	Medición	Infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR)
		Sulfatación	Abs/mm ó UFM	Medición	Infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR)
		Hollín	Abs/mm ó UFM	Medición	Infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR)
		Elementos metálicos: Fe, Cu, Cr, Al, Pb, Sn	Ppm	Medición	Espectroscopia de emisión atómica
		Contaminantes: K, Na, B, Si	Ppm	Medición	Espectroscopia de emisión atómica
Aditivos: Zn, Ca, P, Mg, Ba, Mo	Ppm	Medición	Espectroscopia de emisión atómica		

## CAPÍTULO II

### 2. ESTADO DE LA CIENCIA

#### 2.1. Introducción Tribología

Es el estudio de superficies en contacto y es de extrema importancia en el ámbito tecnológico, abarca disciplinas; desde la física y la química, hasta la ingeniería mecánica y la ciencia de materiales. Se la puede definir como el estudio de la ciencia y tecnología de la interacción de superficies en movimiento relativo. (Schouwenaars Franssens, 2004)

La tribología se fundamenta en el estudio de tres aspectos que son: la fricción, desgaste y la lubricación.

##### 2.1.1. Fricción

Es la resistencia al deslizamiento de un cuerpo sobre ó a lo largo de otros, la fricción es catalogada o considerada como un método de pérdida de energía y en muchos casos es un problema difícil de controlar. En algunos casos es necesario tener coeficientes de fricción elevados (superiores a 0.5); como ejemplo se puede mencionar el caso de un neumático sobre el pavimento. También se presentan casos donde lo ideal es tener coeficientes de fricción con valores bajos como en el caso de los cojinetes con los muñones del cigüeñal. (Schouwenaars Franssens, 2004)

La fricción es la resistencia al movimiento durante el deslizamiento o el balanceo, que se experimenta cuando un cuerpo sólido se mueve tangencialmente sobre otro con el que está en contacto. Hay dos tipos principales de fricción que comúnmente se encuentran: fricción en seco y fricción de fluido. (Bhushan, 2013)

- Fricción en seco

Describe la componente tangencial de la fuerza de contacto que existe cuando dos superficies secas se mueven o tienden a moverse una con relación a otra. (Bhushan, 2013)

- Fricción de fluido

La fricción por fluido describe la componente tangencial de la fuerza de contacto que existe entre capas adyacentes en un fluido que se mueve a velocidades diferentes entre sí como en un líquido o gas entre superficies de apoyo. (Bhushan, 2013)

De donde la fuerza de fricción es considerada como la fuerza normal por el coeficiente de fricción ya sea este coeficiente estático o cinemático como se representa en la siguiente ecuación:

***Ecuación 1. Fuerza de fricción***

$$f = F_N \times u$$

*f = Fuerza de fricción*

*F<sub>N</sub> = Fuerza Normal*

*u = Coeficiente de fricción*

En la Tabla 3, se presenta los valores de los coeficientes de fricción de los líquidos lubricantes de acuerdo al origen de producción.

**Tabla 3.**  
**Coeficientes de fricción de líquidos lubricantes**

<b>Líquido lubricante</b>	<b>Coeficiente de fricción</b>
Grasas animales y aceites vegetales	0.02 – 0.05
Aceites a base de petróleo	0.02
Aceites sintéticos	0.02 – 0.03

Fuente: (Bhushan, 2013)

### 2.1.2. Desgaste

Conocido como el fenómeno de la eliminación de material de una superficie debido a la interacción con una superficie de acoplamiento, ya sea por deslizamiento, rodamiento o impacto. Casi todos los equipos pierden su fiabilidad debido al desgaste. Este desgaste es el resultado de la eliminación de material por separación física debido a la microfractura, por disolución química o por fusión en la superficie de contacto. Existen diferentes tipos de desgaste y son: adhesivo, abrasivo, fatiga y por corrosión. (Ortega, 2014)

#### a. Desgaste Adhesivo

Este desgaste está asociado con la agrupación de uniones adhesivas en la superficie. Estas se forman mediante la interacción de dos o más superficies. La fuerza de estos enlaces depende en gran medida de la naturaleza físico-química de las superficies de contacto. (Kato, Koji & Adachi, 2001)

Los parámetros que influyen en el desgaste adhesivo son:

- Condición de lubricación; suministro de lubricante; calidad del lubricante.
- Compatibilidad metalúrgica de los materiales.
- Condiciones de trabajo: carga, velocidad y temperatura. (EcuRed, 2016)

#### b. Desgaste Abrasivo

La norma ASTM postula que se produce debido a partículas duras o protuberancias duras que son forzadas contra una superficie y se mueven a lo largo de otra superficie sólida. (Tylczak, 2004)

### c. Desgaste por Fatiga

Ocurre cuando un material está sujeto a tensiones cíclicas. Debido a las tensiones introducidas en las capas superficiales del material, las grietas que son paralelas a la superficie se desarrollan dentro del material. Cuando alcanzan un tamaño crítico, generan restos de escamas. Este fenómeno también se conoce como desgaste por delaminación. (Takadoum, 2007)

### d. Desgaste por Corrosión

Ocurre cuando el deslizamiento tiene lugar en un ambiente corrosivo. El medio corrosivo más dominante es el oxígeno. En ausencia de deslizamiento, los productos químicos de la corrosión forman una película típicamente menor que un micrómetro de grosor en las superficies, lo que tendería a ralentizar o incluso detener la corrosión, la acción de deslizamiento lleva la película química de distancia, de modo que el ataque químico puede continuar. El desgaste corrosivo requiere tanto la reacción química (corrosión) y el frotamiento. (Bhushan, 2013)

En la Tabla 4. se muestran los valores permisibles de los elementos de desgaste que componen a las partes internas del motor, las cuales sufren deterioro aún a pesar de tener una correcta lubricación.

**Tabla 4.**  
**Valores permisibles elementos de desgaste**

<b>Propiedad Metales (ppm)</b>	<b>Método</b>	<b>Valor permisible (ppm)</b>
Sn		10
Fe		100
Al	Espectrometría de Emisión Atómica	20
Ni		5
Cu		15
Pb		100
Cr		40

La Tabla 5, indica las posibles fuentes de desgaste de los componentes internos del motor, en base al conteo de partículas.

**Tabla 5.**  
**Posibles fuentes de desgaste**

	<b>Resultados de prueba elevados</b>	<b>Posibles Fuentes</b>
Motores diésel	Hierro, cromo	Camisas de cilindro, anillos del pistón
	Hierro, cromo, aluminio	Camisas de cilindro, anillos del pistón, falda de pistón de aluminio
	Plomo, aluminio, hierro	Cojinetes de biela inferiores y cojinetes de bancada, cigüeñal
	Sodio, potasio, cobre	Contaminación del refrigerante
	Silicio más que aluminio, hierro, plomo	Tierra, camisas de cilindro, anillos del pistón, revestimiento de los cojinetes
	Hollín, hierro, plomo, cromo	Desgaste del hollín en camisas de cilindros, anillos de pistón, cojinetes

### 2.1.3. Lubricación

Las funciones primarias de un lubricante son reducir la fricción, el desgaste y el daño en la superficie mediante la prevención del contacto de las asperezas de dos cuerpos sólidos, cuando las superficies son metálicas, el lubricante debe inhibir la formación de cualquier unión metálica fuerte la cual permita el desgaste adhesivo. Por definición, cualquier gas o vapor, líquido o sólido puede servir como lubricante manteniendo físicamente las asperezas separadas. (González, 2012)

- Efecto de la temperatura en la viscosidad

Una manera común de disminuir la viscosidad del fluido es aumentar su temperatura. Dado que la viscosidad es un parámetro de diseño crítico, es importante poder cuantificar su respuesta a la temperatura. Aunque se han propuesto una serie de modelos matemáticos teóricos y empíricos durante más de 100 años. (Kudish & Covitch, 2010)

- Calor

Cuando un cuerpo se pone en contacto con otro que está a una temperatura diferente, el calor se transfiere del cuerpo caliente al frío, hasta que ambos alcanzan un equilibrio térmico o posean la misma temperatura. (Cengel & Boles, 2008)

***Ecuación 2. Efecto de la temperatura en la viscosidad***

$$\log[\log(\eta + \theta)] = A - B \log T$$

Donde:

$\eta =$  viscosidad cinemática

$T =$  Temperatura absoluta en °K

$A, B$  y  $\theta =$  son constantes empíricas

- Efecto de la presión en la viscosidad

Los aceites lubricantes a menudo experimentan presiones muy altas, especialmente en contactos tribológicos muy cargados tales como cojinetes, engranajes y en sistemas de transmisión de energía hidráulica. (Jean, Jacques, & Parc, 1989)

Si los lubricantes eran perfectamente incompresibles, la viscosidad no se vería afectada por la presión. Debido a la existencia de volumen libre en el estado líquido de la mayoría de las sustancias orgánicas, los aceites lubricantes son algo compresibles y la resistencia interna al flujo aumenta con la presión. Dado que el espesor de la película elastohidrodinámica se rige, en gran parte, por la viscosidad, las superficies opuestas en un contacto fuertemente cargado pueden estar mejor soportadas por un lubricante bajo presión que bajo condiciones ambientales. (Jean, Jacques, & Parc, 1989)

A presiones muy altas, la viscosidad aumenta a una velocidad más lenta de lo previsto, y puede ser modelada por una relación de ley de potencia que se representa con la siguiente ecuación. (Kudish & Covitch, 2010)

**Ecuación 3. Efecto de la presión en la viscosidad**

$$\mu = P_a(1 + C_p)^n$$

Donde:

$\mu =$  viscosidad

$P_a =$  viscosidad a presión atmosférica

$C_p =$  Calor específico de presión

$n = 16$

- Lubricación Elastohidrodinámica (EHL)

Es otra forma de lubricación hidrodinámica basada en la ecuación de Reynolds, considerando la deformación elástica de las superficies sólidas y las características de viscosidad-presión de un lubricante. (Shizhu & Ping, 2012)

Es un estado de lubricación hidrodinámica que se caracteriza por la deformación elástica de las irregularidades de ambas superficies, debido a la carga que actúa sobre ellas. La presión hidráulica de la película lubricante es lo suficientemente alta como para separarlas. (IngesAerospace, 2011)

**Ecuación 4. Película del lubricante**

$$\lambda = \frac{h_o}{\sigma}$$

Donde:

$\lambda =$  Película lubricante (< 1,5)

$h_o =$  Espesor mínimo de la película lubricante (0,05 y 2  $\mu\text{m}$ )

$\sigma =$  Rugosidad promedio de las superficies metálicas

## 2.2. Factores de la degradación de aceites

### 2.2.1. Degradación de aceite lubricante

La vida útil de un aceite, es el período de tiempo funcional del aceite en una máquina, hasta que los antioxidantes se consumen, produciendo grandes cambios en las propiedades físicas (la densidad, la viscosidad) y químicas del aceite base, resultando un desgaste de los componentes y un eventual mal funcionamiento de la máquina. El proceso de degradación del aceite es un problema común en los sistemas de lubricación. (Arguello, 2010)

En la tabla 6, se indican los intervalos de límites críticos y de precaución que el lubricante debe poseer referente a la condición del aceite.

**Tabla 6.**  
**Límites de precaución y críticos de la condición del aceite**

<b>Condiciones del Aceite (UFM)</b>				
	<b>Oxidación</b>	<b>Nitración</b>	<b>Sulfatación</b>	<b>Hollín</b>
Aceite Nuevo o Línea Base	LB	LB	LB	LB
Límite de Precaución Superior	LB+15	LB+15	LB+15	LB+15
Límite Crítico Superior	LB+20	LB+20	LB+20	LB+20

Fuente: Caterpillar

**Ecuación 5. Límite de precaución superior para la condición de aceite**

$$LPS = LB + 15$$

**Ecuación 6. Límite crítico superior para la condición del aceite**

$$LCS = LB + 20$$

La Tabla 7, indica las principales causas de la degradación del aceite y son: la oxidación (oxígeno), hidrólisis (agua) y degradación térmica (altas temperaturas). En varias ocasiones puede ser una combinación de los tres procesos.

**Tabla 7.**  
**Factores de la degradación de aceite**

<b>Proceso</b>	<b>Oxidación</b>	<b>Hidrólisis</b>	<b>Degradación Térmica</b>
<b>Reactivo</b>	Oxígeno	Agua	Calor
	Temperatura/Agua	Oxígeno/Temperatura	Agua/Oxígeno
<b>Proceso catalizado por:</b>	Metales de transición (partículas metálicas, Cu, Fe, Si) Contaminantes (contaminación en general, productos de oxidación) Presión		

Fuente: (JENSEN, 2015)

### 2.2.2. Oxidación

Proceso de degradación del aceite usando el oxígeno como agente reactivo. Esto implica una serie de reacciones que originan compuestos ácidos y polímeros. El proceso de la oxidación conduce a productos insolubles (resinas), los cuales pueden precipitarse formando una película fina, formando barnices o lacas en superficies metálicas frías o calientes.

Factor responsable de una gran cantidad de problemas en el lubricante incluyendo incremento de la viscosidad, formación de barniz, lodos, sedimentos, agotamiento de aditivos, degradación de la base lubricante, taponamiento de filtros, pérdida para el control de la espuma, incremento en el número total ácido (TAN), formación de herrumbre y corrosión. Por lo tanto, entender y controlar la oxidación es una prioridad para los químicos que desarrollan lubricantes. (Lublearn, La oxidación enemiga del lubricante, 2014)

### 2.2.3. Hidrólisis

Proceso de descomposición del aceite con el agua como reactivo. Al igual que en el proceso de oxidación, el proceso de hidrólisis también puede llevar a la formación de compuestos ácidos y barniz. Los productos de la oxidación tales como hidroperóxidos, ácidos carboxílicos, cetonas, aldehídos, son en general solubles en agua y consecuentemente pueden acelerar el proceso de hidrólisis.

#### **2.2.4. Degradación Térmica**

Proceso de descomposición del aceite por medio del calor (altas temperaturas). Regularmente, la degradación térmica tiene lugar en puntos del sistema con altas temperaturas. También pueden resultar polímeros y compuestos insolubles, los cuales pueden conducir a la formación de barniz, tal y como sucede en el proceso de oxidación.

### **2.3. Lubricantes**

Se considera lubricante a cualquier sustancia ya sea esta sólida, semisólida o líquida de origen animal, vegetal, sintético o mineral, que colocada entre dos elementos o superficies, sea capaz de disminuir el coeficiente de fricción existente entre ellas, por lo tanto que permita a su vez prolongar la vida útil de los elementos móviles. (Gulf, 2015)

#### **a. Semisólidos**

Llamados también grasas que son creadas a partir de aceites minerales y de agentes espesantes (jabón, arcilla principalmente), lo cual permite retener el lubricante en los sitios aplicados. Son más eficaces en la protección de los elementos de las impurezas externas, aunque no fluyen como los lubricantes líquidos, son menos refrigerantes. (González, 2012)

#### **b. Sólidos**

Son aquellos empleados cuando las piezas que van a ser lubricadas se encuentran a temperaturas y presiones extremas de funcionamiento. Por ejemplo: grafito, bisulfuro de molibdeno. (González, 2012)

#### **2.3.1. Funciones de los lubricantes**

La función del lubricante no es simplemente disminuir el desgaste de los elementos en contacto, sino también son capaces de ejercer funciones

complementarias para mantener un equipo en operación idónea y por rangos de tiempo mucho más prolongados. (Gulf, 2015)

Los factores son:

- Contribuir como refrigerante
- Transmisor de energía
- Facilitar la limpieza de impurezas
- Proteger contra el desgaste, corrosión y oxidación
- Sellador o sellante

### **2.3.2. Tipos de Lubricantes**

Lubricantes líquidos: Son los más ampliamente utilizados existen cuatro tipos: aceite mineral, aceite de origen vegetal o animal, aceite compuesto y aceite sintético.

- Aceite mineral: Son aquellos que se los obtiene a partir de la destilación del petróleo.
- Aceite de origen vegetal o animal: Aquellos denominados como aceites grasos por ejemplo: aceite de oliva, de tocino, glicerina, etc.
- Aceite compuesto: Son el resultado de la combinación de los aceites minerales con los aceites de origen vegetal o animal, a estos se les adiciona aditivos que permitan optimizar sus propiedades.
- Aceite sintético: Se lo define como un producto elaborado a partir de una reacción química que combina varios elementos con bajo peso molecular y con ello obtener uno con un mayor peso molecular, el cual supera las propiedades características de los aceites minerales. (Lubtek, 2016)

### **2.3.3. Clasificación de los lubricantes**

Para poder seleccionar el aceite de motor más adecuado se debe tomar en consideración las tres clasificaciones que existen: por la viscosidad SAE

(Sociedad de Ingenieros Automotrices) y por las condiciones de servicio: API (Instituto Americano del Petróleo) y ACEA (Asociación de Constructores Europeos de Automóviles).

a. Clasificación SAE

SAE (Sociedad de Ingenieros Automotrices), clasifica a los aceites lubricantes de acuerdo al grado de viscosidad, siendo de acuerdo a ello designados como aceites monogrados y aceites multigrados.

b. Aceites monogrados

Un aceite monogrado presenta condiciones idóneas de funcionamiento en un rango de operación a temperaturas ambientales limitadas, además se les asigna un número el cual es un valor que indica su viscosidad que puede estar o no precedida por la letra “W” como se indican en la Tabla 8, cuando estos aceites presentan en su nomenclatura la letra “W”, significa que son aptos para trabajar en épocas de invierno, caso contrario al no presentar la letra “W” esos aceites lubricantes pueden presentar un comportamiento inadecuado; por lo tanto son aptos para trabajar en épocas de verano. (Cipriano, 2009)

**Tabla 8.**  
**Aceites monogrados**

<b>Grado</b>	<b>Descripción</b>
<b>SAE 10</b>	Se lo emplea en lugares con temperaturas inferiores a 0°C.
<b>SAE 20</b>	Se lo emplea en lugares con clima templado y con temperaturas menores a 0°C, era usado antiguamente para asentar los motores de combustión interna nuevos.
<b>SAE 30</b>	Se lo emplea en lugares con clima cálido, usado en automóviles.
<b>SAE 40</b>	Se lo emplea en vehículos de carga pesada y en climas cálidos.

Fuente: (Cipriano, 2009)

### c. Aceites multigrados

Los aceites multigrados poseen mejorador de índice de viscosidad, con ello se puede asegurar un mejor comportamiento del lubricante en frío o a temperaturas elevadas, con ello se puede garantizar una perfecta formación de la película de aceite. La nomenclatura de los aceites multigrados consiste en dos valores numéricos y entre ellos se encontrará la letra “W” que significa “Winter”, en español invierno. (Gulf, 2015)

En la actualidad los fabricantes de vehículos de carga liviana y pesada prefieren el uso de los aceites multigrados debido a sus grandes beneficios en cuanto a consumo de aceite, ahorro de combustible, mayor vida útil del lubricante, entre otros. En la Tabla 9, se indican las principales características de los aceites lubricantes multigrados según la norma SAE (J300, 2013).

**Tabla 9.**  
**Clasificación SAE J300**

Grado de Viscosidad SAE	Viscosidad a Baja Temperatura		Viscosidades en alta temperatura (°C)		
	Máx. Arranque en frío ASTM D5293	Máx. de Bombeo (Sin esfuerzo) ASTM D4684	Cinemática (cSt) a 100°C min. ASTM D445	Cinemática (cSt) a 100°C máx. ASTM D445	Alta Tasa de Corte (cP) a 150°C ASTM D4683, D4741 y D5481
<b>0W</b>	6,200 a -35°C	60,000 a -40°C	3,8	-	-
<b>5W</b>	6,600 a -30°C	60,000 a -35°C	3,8	-	-
<b>10W</b>	7,000 a -25°C	60,000 a -30°C	4,1	-	-
<b>15W</b>	7,000 a -20°C	60,000 a -25°C	5,6	-	-
<b>20W</b>	9,500 a -15°C	60,000 a -20°C	5,6	-	-
<b>25W</b>	13,000 a -10°C	60,000 a -15°C	9,3	-	-
<b>20</b>	-	-	5,6	<9,3	2,6
<b>30</b>	-	-	9,3	<12,5	2,9
<b>40</b>	-	-	12,5	<16,3	3,5 (0W-40, 5W-40, 10W-40)
<b>40</b>	-	-	12,5	<16,3	3,7 (15W-40, 20W-40, 25W-40, 40)
<b>50</b>	-	-	16,3	<21,9	3,7
<b>60</b>	-	-	21,9	<26,1	3,7

Fuente: (Paez, 2013)

#### d. Clasificación API

La marca de certificación API (Instituto Americano del Petróleo) o también conocido como “STARBURST”, garantiza que la calidad de los aceites lubricantes para motor ya sean estos para vehículos a gasolina o diésel cumplan con los más altos estándares de calidad, los cuales están determinados por los fabricantes de los vehículos. (Matters, 2012)

Existen dos categorías dentro de la clasificación API:

Categoría S (Spark Combustion): Contempla los vehículos como: furgonetas, automóviles y camionetas ligeras que poseen motor de combustión interna a gasolina.

Categoría C (Combustion by Compression): Contempla a los vehículos de transporte de pasajeros, carga pesada y maquinaria que poseen motor diésel. La Tabla 10. contiene la clasificación de los lubricantes según API.

**Tabla 10.**  
**Clasificación API para motores diésel**

<b>Clasificación</b>	<b>Estado</b>	<b>Características</b>
<b>CJ-4</b>	Vigente	Para motores diésel de alta velocidad con ciclos de cuatro tiempos, diseñados para cumplir las normas de emisiones de gases de escape para modelos de automóviles en carretera del año 2010 y anteriores. Estos aceites están formulados para su utilización en todas las aplicaciones con combustibles diésel con un contenido de azufre de hasta 500 ppm (0,05 % en peso). Los aceites CJ-4 son especialmente eficaces en el mantenimiento de la durabilidad del sistema de control de emisiones cuando se emplean filtros de partículas y otros sistemas

---

		<p>avanzados de postratamiento de los gases de escape. La protección es óptima para el control de la contaminación del catalizador, bloqueo de filtros de partículas, dispersantes del hollín, espesamiento debido a la oxidación, formación de espuma y pérdida de viscosidad debido al cizallamiento. Los aceites API CJ-4 superan los niveles de prestaciones API CI-4 con CI-4 PLUS, CI-4, CH-4, CG-4 y CF-4.</p>
<b>CI-4</b>	Vigente	<p>Se comenzó a utilizar en el año 2002. Para motores diésel alta velocidad con ciclos de cuatro tiempos, diseñados para cumplir con las normas de emisiones de gases de escape del año 2004 implementadas en el año 2002. Los aceites CI-4 son formulados para mantener la durabilidad del motor cuando se emplean sistemas de recirculación de gases de escape, diseñados para ser utilizados con combustibles diésel con un contenido de azufre de hasta 0,5% en peso. Puede utilizarse en lugar de aceites CD, CE, CF-4, CG-4, y CH-4. Algunos aceites CI-4 también pueden cualificarse como CI-4 PLUS.</p>
<b>CH-4</b>	Vigente	<p>Se comenzó a utilizar en el año 1998. Para motores de alta velocidad con ciclos de cuatro tiempos, diseñados para cumplir con las normas de emisiones de gases de escape del año 1998. Los aceites CH-4 están específicamente formulados para su uso con combustibles con un contenido de azufre de hasta 0,5 % en peso. Puede utilizarse en lugar de aceites CD, CE, CF-4 y CG-4.</p>

---

Las clasificaciones CG-4, CF-4, CF-2, CE, CD-II, CD, CC, CB y CA, son obsoletas.

#### e. Clasificación ACEA

La clasificación ACEA (Asociación de Constructores Europeos de Automóviles), fue creada en el año de 1996. Basada en las características de operación de los motores, además del tipo de servicio que cada automotor realiza ya sea este vehículo de carga liviana o de carga pesada, con motor gasolina o diésel.

La normativa divide a los aceites lubricantes en varias series específicas de acuerdo al tipo de motor, la designación está establecida primero por una letra (A: motores a gasolina, B: motores a diésel de carga liviana, C: motores que cumplen la normativa EURO IV, E: motores diésel de carga pesada) y por un número que va de 1 a 5 que indican en orden ascendente el nivel de calidad que el aceite posee. (Pérez, 2012)

#### Categoría o serie C

Contempla a vehículos que poseen dispositivos destinados a cumplir la normativa EURO III, siendo estos filtros de partículas (FAP) o catalizadores, abarca 4 subcategorías las cuales se muestran en la Tabla 11.

**Tabla 11.**  
**Categoría o serie C**

<b>ACEA</b>	<b>Descripción</b>
<b>C1</b>	Basado en la categoría A5/B5 con fuerte limitación en el contenido de SAPS (cenizas, fósforo y azufre)
<b>C2</b>	Más cantidad de SAPS que C1, baja viscosidad, ahorro de combustible.
<b>C3</b>	Más viscosidad (5W30, 5W40) y mejor protección frente al desgaste que el C2, SAPS igual que C2.
<b>C4</b>	Limitación de SAPS y protección del FAP y otros dispositivos de tratamiento de gases avanzados, alta detergencia.

Fuente: (PublicacionesDidácticas, 2015)

### Categoría o serie E (Vehículos carga pesada)

Especializada para vehículos que se encuentran sometidos a trabajar en condiciones y a cargas severas como se muestra en la Figura 12 y 13.

**Tabla 12.**

**Categoría o serie E**

<b>ACEA</b>	<b>Descripción</b>
<b>E1 (1996)</b>	Aceites para motores de carga pesada.
<b>E2 (1996)</b>	Control mejorado del desgaste, pulido de camisas, depósitos y barnices versus E1. Menor consumo de aceite. Mayor kilometraje.
<b>E3 (1996)</b>	Control mejorado del desgaste, pulido de camisas, depósitos y barnices versus E2. Menor consumo de aceite y mejor manejo del hollín. Mayor kilometraje.
<b>E4 (1998)</b>	Aceites para los motores más desarrollados de Europa, con sistemas de mantenimiento flexible y control de emisiones. Potencial para economía de combustible y aun mayor duración.
<b>E5 (1999)</b>	Incorpora mayor cantidad de ensayos de motores americanos. Cumple con los requerimientos de E4 y todos los de API CH-4.

Fuente: (CAL, 2012)

**Tabla 13.**

**ACEA categoría E-2004**

<b>ACEA 2004</b>	<b>Descripción</b>
<b>E4</b>	Aceite de alto rendimiento, amplios intervalos de sustitución (>90.000 km) y condiciones de funcionamiento extremadamente severas.
<b>E6</b>	Basado en el E4 pero con bajos SAPS. Adecuado para vehículos con tratamientos de gases de escape y condiciones de funcionamiento extremadamente severas.
<b>E7</b>	Para motores sometidos a condiciones de funcionamiento severas, intervalos de sustitución normales (<50.000 km)
<b>E9</b>	Para motores sometidos a condiciones de funcionamiento severas, bajo contenido en SAPS, intervalos de sustitución normales.

Fuente: (PublicacionesDidácticas, 2015)

## 2.4. Aditivos de los lubricantes

Son sustancias químicas que se les adiciona a las bases lubricantes, con el fin de que ciertas propiedades del lubricante sean mejoradas y por consiguiente obtener un lubricante con características específicas. El porcentaje de uso de los aditivos en un lubricante oscila entre (10 al 30 %) del volumen total. (Albarracin, 2013)

Si estos valores llegarán a superarse en vez de que el lubricante sea beneficioso para los elementos internos, provocaría graves efectos secundarios. En la Tabla 14. se indican los valores límites de precaución y críticos que el pack de aditivos de un lubricante de motor debe poseer.

**Tabla 14.**  
**Límites críticos y de precaución del pack de aditivos**

<b>Pack de aditivos (ppm)</b>				
Aceite Nuevo o Línea Base (LB)	Ca (Calcio)	Mg (Magnesio)	Zn (Zinc)	P (Fósforo)
Límite de Precaución Superior	(LB-10%)	(LB-10%)	(LB-10%)	(LB-10%)
Límite Crítico Superior	(LB-25%)	(LB-25%)	(LB-25%)	(LB-25%)

### ***Ecuación 7. Límite de precaución superior para el pack de aditivos***

$$LPS = LB - 10\%$$

### ***Ecuación 8. Límite crítico superior para el pack de aditivos***

$$LCS = LB - 25\%$$

Características de los aditivos:

- Disminuir la velocidad de oxidación del aceite durante su tiempo de servicio o de vida útil.
- Mejorar la estabilidad de la película del lubricante.
- Proteger a las superficies de posibles contaminantes como impurezas, agua, entre otros.

- Estimular las propiedades físico-químicas del lubricante.

## 2.5. Viscosidad

La viscosidad es considerada como la resistencia de un líquido a fluir. Es considerada la característica más importante del lubricante; esta propiedad solo se presenta en líquidos en movimiento. (WIDMAN, 2016)

Se puede acotar dos aspectos primordiales que los diseñadores deben tomar en consideración referente a la viscosidad:

- La medida de cómo se comporta el fluido ante la presión, llamada viscosidad absoluta o dinámica, medida en Centipoises (cP).
- La medida de cómo se comporta el fluido ante la gravedad, llamada viscosidad cinemática y se la mide en Centistokes (cSt). (Noria, ISO Viscosity Grades, 2001)

### 2.5.1. Viscosidad dinámica

La viscosidad dinámica es la relación que existe entre el esfuerzo cortante y la gradiente de velocidad y se expresa mediante Ecuación 1:

#### *Ecuación 9. Viscosidad Dinámica*

$$\eta = \frac{T}{(\Delta v / \Delta y)} = T \left( \frac{\Delta y}{\Delta v} \right)$$

Conforme un fluido se mueve, dentro de él se desarrolla un esfuerzo cortante, cuya magnitud depende de la viscosidad del fluido. Se define al esfuerzo cortante (T) como la fuerza que se requiere para que una unidad de área de una sustancia se deslice sobre otra. (Mott, 2006)

El gradiente de velocidad es una medida el cambio de velocidad y se define como  $(\Delta v / \Delta y)$ .

**Ecuación 10. Análisis dimensional viscosidad dinámica**

$$\eta = T \left( \frac{\Delta y}{\Delta v} \right)$$

$$\eta = \frac{N}{m^2} \left( \frac{m}{\frac{m}{s}} \right)$$

$$\eta = \frac{N \times s}{m^2}$$

$$\eta = \frac{MLT^{-2} \times T}{L^2}$$

$$\eta = ML^{-1}T^{-1}$$

**2.5.2. Viscosidad cinemática**

La viscosidad cinemática es la relación existente entre la viscosidad dinámica y la densidad del fluido. (Mott, 2006)

**Ecuación 11. Viscosidad Cinemática**

$$v = \frac{\eta}{\rho}$$

Donde:

*v*: Viscosidad cinemática

*η*: Viscosidad dinámica

*ρ*: Densidad del fluido

**Ecuación 12. Análisis dimensional de la viscosidad cinemática**

$$v = \frac{\eta}{\rho}$$

$$v = \frac{kg/m \times s}{kg/m^3} = \frac{m^2}{s}$$

$$v = \frac{L^2}{T}$$

$$v = L^2T^{-1}$$

En la Tabla 15. se indican los valores críticos y de precaución tanto superiores como inferiores que el lubricante de motor debe poseer respecto a la viscosidad tomada a 100°C según la norma ASTM D-445.

**Tabla 15.**

**Límites crítico y de precaución de la viscosidad de un lubricante de motor  
Viscosidad @ 100°C (cSt)**

Aceite Nuevo o Línea Base	LB
Límite Precaución Inferior	(LB-5%)
Límite Precaución Superior	(LB+10%)
Límite Crítico Inferior	(LB-10%)
Límite Crítico Superior	(LB+20%)

**Ecuación 13. Límite de precaución inferior para la viscosidad**

$$LPI = LB - 5\%$$

**Ecuación 14. Límite de precaución superior para la viscosidad**

$$LPS = LB + 10\%$$

**Ecuación 15. Límite crítico inferior para la viscosidad**

$$LCI = LB - 10\%$$

**Ecuación 16. Límite crítico superior para la viscosidad**

$$LCS = LB + 20\%$$

En la Tabla 16. se indica la norma DIN 51519 que determina los grados de viscosidad ISO.

**Tabla 16.**

**Grados de viscosidad ISO según DIN 51519**

Grado de Viscosidad ISO VG	Viscosidad cinemática media cSt @ 40°C	Límite inferior cSt @ 40°C	Límite superior cSt @ 40°C
2	2,2	1,98	2,42
3	3,2	2,88	3,52
5	4,6	4,14	5,06

CONTINÚA



7	6,8	6,12	7,48
10	10	9	11
15	15	13,5	16,5
22	22	19,8	24,2
32	32	28,8	35,2
46	46	41,4	50,6
68	68	61,2	74,8
100	100	90	110
150	150	135	165
220	220	198	242
320	320	288	352
460	460	414	506
680	680	612	748
1000	1000	900	1100
1500	1500	1350	1650
2200	2200	1980	2420
3200	3200	2880	3520

Fuente: (Noria, ISO Viscosity Grades, 2001)

### 2.5.3. Importancia de la viscosidad

Cuando la viscosidad es demasiada baja la película de aceite puede desaparecer de los elementos en contacto y con ello producir graves daños, además cuando la viscosidad es demasiada alta el lubricante no es capaz de llegar a los sitios que lo requieren debido a que su consistencia es demasiada espesa. (WIDMAN, 2016)

## 2.6. TBN (Número Total Base) y TAN (Número Total Ácido)

### 2.6.1. TBN (Número Total Base)

Se la puede definir como la reserva alcalina o básica dada en miligramos de Hidróxido de Potasio por cada gramo de aceite (mg KOH/gr); que contiene el aceite para neutralizar los ácidos procedentes de la combustión, así como también los ácidos que se originan por la degradación del mismo aceite lubricante cuando se encuentra a temperaturas elevadas de operación. (Martínez, 2005)

Para poder establecer un criterio rápido en cuanto a los rangos operativos que el TBN o BN que un aceite lubricante debe tener para seguir en operación se establecen en la Tabla 17. los parámetros permisibles y funcionales del lubricante según la norma ASTM D-974.

**Tabla 17.**  
**Límites de precaución y críticos del aceite lubricante del TBN**

<b>TBN (Número Total Base) (mg KOH/gr)</b>		
Aceite Nuevo o Línea Base	Límite Precaución Inferior	Límite Crítico Inferior
LB	50% de la LB	20% de la LB

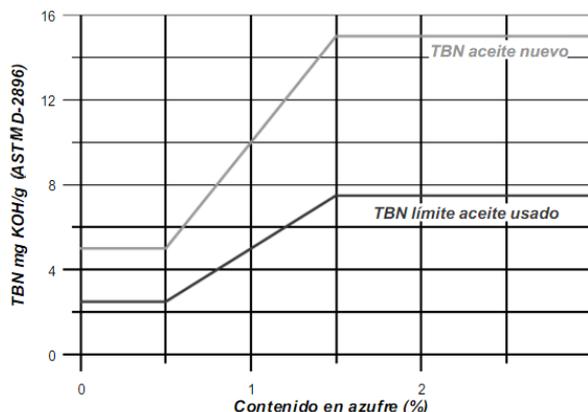
**Ecuación 17. Límite de precaución inferior para el TBN**

$$LPI = 50\% \text{ de la LB}$$

**Ecuación 18. Límite crítico inferior para el TBN**

$$LCI = 20\% \text{ de la LB}$$

La Figura 1. indica los rangos máximos y mínimos que el TBN puede llegar a tener en su vida util.



**Figura 1. Nivel de TBN necesario en el aceite nuevo y aceite usado según el contenido de azufre del combustible**

**Fuente: Caterpillar**

Los cambios en el Número Total Base (TBN) de un aceite, pueden ser ocasionados por múltiples motivos, entre las cuales se puede mencionar alto contenido de azufre en el combustible, dilución con combustible, incorrecta combustión, excesivo paso de gases al cárter, contaminación con

hollín, oxidación, sobrecalentamiento, intervalos de cambio de aceite extendidos, contaminación con glicol y aceite incorrecto. (Lublearn, Noria, 2016)

***Ecuación 19. Unidades del TBN***

$$TBN = mg\ KOH / gr$$

### **2.6.2. TAN (Número Total Ácido)**

La medida de la acidez del aceite o número total ácido TAN, es una propiedad no muy utilizada para el monitoreo de aceites de motor Diesel, ya que los aditivos detergentes y dispersantes, provocan medidas erradas de este parámetro y por tanto resultados desacertados. (Martínez, 2005)

El TAN es la cantidad de base, expresada en miligramos de hidróxido de potasio que se requiere para neutralizar todos los componentes ácidos presentes en un gramo de muestra. (Lublearn, Noria, 2016)

### **2.7. Factores de contaminación del aceite**

Entre los factores principales de contaminación del aceite se tiene:

- Partículas metálicas: Producidas del desgaste interno de los componentes metálicos del motor, con ello aportando a la degradación del aceite lubricante.
- Polvo atmosférico e impurezas: Son introducidas al motor mediante el sistema de admisión y por ende debido al uso de filtros de aire de baja calidad, ductos de aire rotos, etc.
- Óxidos metálicos: Provenientes del desgaste metálico y oxidación de dichas partículas metálicas.
- Productos carbonosos: Son el resultado obtenido del paso de los gases combustionados hacia el cárter.

- Agua: Proveniente del vapor de la condensación originada en el proceso de combustión o bien producida por fugas o daños internos del sistema de refrigeración.
- Combustible: Este tipo de contaminación ingresa al aceite por medio del soplado blow by (gases de escape del cárter), producido por daños en los inyectores, combustión o por operar con el motor frío. Afectando con ello a la viscosidad del aceite.
- Contaminación bacteriológica o microbiológica: Consiste en el desarrollo de organismos vivos en el lubricante, los cuales producen la infección del mismo debido al carácter parafínico que poseen los aceites. La influencia o daños que estos organismos vivos ejercen en el lubricante, afecta a sus propiedades físico-químicas.
- Productos varios: Son aquellos residuos contaminantes que quedan después de realizar un mantenimiento. (Martínez, 2005)

## **2.8. Manipulación y almacenamiento de aceites lubricantes**

Durante la elaboración de los aceites lubricantes, las entidades a cargo utilizan los más severos estándares de limpieza y control de calidad, con el fin de asegurar que el producto destinado a salir de sus instalaciones cumpla con las especificaciones establecidas y requeridas en el medio. (Calu, 2015)

Las condiciones bajo las cuales los aceites lubricantes deben ser almacenados son importantes ya que pueden perjudicar su rendimiento. El uso y manejo de un inventario, tiene una función muy importante en lo que a manipulación del producto concierne. (Calu, 2015)

La contaminación del aceite lubricante es una de las causas más comunes para que una maquinaria tienda a sufrir una avería o daño inesperado. La misma puede ocurrir durante el proceso de transporte, almacenamiento, manipulación o simplemente en la aplicación del lubricante en el equipo. (Calu, 2015)

Si los bidones de aceite se almacena en forma vertical y se exponen al medio ambiente, existen grandes posibilidades que se contamine, en especial por agua de lluvia. Lo cual impedirá que un aceite lubricante ejerza sus funciones adecuadamente. (Uribe, 2014)

Las propiedades de los lubricantes pueden cambiar ampliamente durante el proceso de almacenamiento, debido a las condiciones como aire/oxígeno, cambios de temperatura, agua, humedad y otros contaminantes. (Uribe, 2014)

Por eso, los aceites deben ser almacenados en lugares cubiertos, frescos, secos, y nunca deben estar expuestos directamente a la luz solar. También deben ser almacenados o preservados en su envase original, el cual debe mantenerse cerrado hasta que sea requerido. Después de su uso, los envases deben ser sellados inmediatamente. (Kullagerfabriken, 2016)

## **2.9. Aceites usados**

Son considerados residuos peligrosos para la salud de los seres vivos, ya que pueden llegar a ocasionar o provocar enfermedades catastróficas si son manipulados sin la debida protección.

Las propiedades de los aceites lubricantes usados dependen únicamente de las bases lubricantes de las cuales se derivan, así como también de los aditivos usados para mejorar la viscosidad, el poder detergente y la resistencia a las elevadas temperaturas. (estrucplan, 2000)

Debido a su poder calorífico, el aceite usado puede ser establecido como uno de los residuos con mayor potencial para ser empleado como combustible para la industria. El aceite lubricante después de haber sido usado, adquiere concentraciones elevadas de metales pesados, resultado del desgaste de los elementos internos del motor. (estrucplan, 2000)

Los aceites lubricantes sufren una descomposición luego de cumplir con su ciclo de operación y por esto es necesario reemplazarlos. Como producto resultante de la degradación del aceite es el hollín. El cual representa una parte de hidrocarburo parcialmente quemado. El tamaño de estas partículas de hollín pueden variar de 0,5 a 1.0 micras, por lo cual resulta muy difícil filtrarlas. (estrucplan, 2000)

## **2.10. Reciclaje del aceite usado**

El reciclaje del aceite usado tienen como propósito ser empleados o reutilizados, para brindar un nuevo servicio en condiciones menos críticas y severas, para las cuales fue fabricado inicialmente, del reciclaje de los lubricantes se puede obtener tres productos a partir de dos métodos y son:

- Mediante la Regeneración: Proceso por el cual se obtiene de los aceites usados un nuevo aceite base comercializable.
- Mediante la Destilación: Proceso por el cual se puede obtener combustible diésel y combustible sin tratar (fueloil).

El proceso comúnmente usado es el ácido-arcilla el cual consiste en:

- El aceite usado es deshidratado a una temperatura de 170°C, eliminando el agua y otros materiales contaminantes con bajo punto de ebullición como nafta y solventes orgánicos.
- Luego se lo deja enfriar hasta que llegue aproximadamente a 30°C o 40°C, después es mezclado con ácido sulfúrico (10% del total del aceite usado), con ello poder eliminar gran parte de las impurezas. De esta mezcla se obtienen compuestos con azufre insoluble (asfalto de fango) y el lodo ácido el cual se lo extrae para ser almacenado en depósitos.
- Después el producto se somete a neutralización, donde se añade óxido de calcio o cenizas de soda, luego se calienta bajo agitación, hasta alcanzar una temperatura de 170°C. El proceso tiene una

duración de 2 a 4 horas. La soda reacciona con el ácido neutralizando el aceite a un  $\text{pH}=7$  y formando yeso.

- Luego el producto obtenido pasa al proceso de filtración que separa el yeso del aceite. La filtración se puede realizar con arcilla para mejorar el color y olor. Por último se realiza una destilación al vacío. (CEMPRE, 2014)

### 2.11. Técnicas de muestreo

- Técnica de vampiro o vacío a través de la varilla indicadora



*Figura 2. Técnica vampiro*

Consiste en el uso de un bombín o bomba manual Figura 2., la cual permite la absorción del aceite lubricante tomado desde el deposito (cárter), mediante el uso de una manguera, uno de sus extremos ingresa por el orificio de la bayoneta de medición de aceite y el otro extremo manguera ingresa en el orificio que posee el bombín considerando que la altura de la manguera con respecto al bombín sea de una pulgada aproximadamente como se indica en la Figura 3. Cada muestra de aceite recolectada contiene 100 ml.



*Figura 3. Altura recomendada de la manguera*

La técnica de vampiro es la más utilizada para la recolección de muestras de análisis S.O.S., permite realizar la obtención de muestras con mayor facilidad, rapidez y libre de impurezas.

Considerar que se debe tomar una muestra de limpieza antes de proceder a recolectar la muestra a ser analizada y consecuentemente etiquetarla para su posterior estudio como se observa en la Figura 4.



*Figura 4. Extracción del aceite lubricante*  
*Fuente: Autor*

- Técnica de acople rápido o muestra directa

La técnica requiere tener la presencia de un acople rápido en una de las líneas por donde el fluido circula como se indica en la Figura 5. usado con mayor frecuencia en la recolección de muestras de refrigerante, aceite hidráulico y aceite de motor. Cada muestra contiene 100 ml.



*Figura 5. Técnica del acople rápido*

Antes de proceder con la recolección de la muestra se tomó en consideración en realizar la extracción de una muestra de limpieza y luego se procedió a extraer la muestra para el análisis S.O.S., con el fin de garantizar los resultados.

## **2.12. Frecuencias de muestreo**

La frecuencia de muestreo debe ajustarse a varias variables, incluyendo penalización económica por falla, severidad del ambiente del fluido, edad de la máquina, edad del aceite y por los resultados del análisis del lubricante. (Wright, 2016)

- Penalización económica por falla

A mayor penalización por falla, la muestra será tomada en intervalos más cortos. Tomar en cuenta el costo por paro, de reparación o de reconstrucción, la paralización total del trabajo y el impacto sobre la calidad del producto y la producción. (Wright, 2016)

- Severidad del ambiente del fluido

Incluye algo más que la contaminación con partículas, fluidos del proceso químico y humedad. Contempla las exigencias del vehículo sobre el lubricante, donde se considera la presión, velocidad, cargas, temperaturas, y el ciclo de trabajo. Mientras mayor sea el riesgo de degradación del aceite, las muestras deberán ser tomadas en intervalos más cortos. (Wright, 2016)

- Edad de la máquina

Una máquina tiene una mayor probabilidad de falla cuando está nueva y cuando ha excedido su máxima vida en servicio. Los intervalos de muestreo deben ser incrementados durante los ciclos de alta probabilidad de falla, en

especial cuando los resultados del análisis del aceite presentan una inminente mortalidad de la máquina. (Wright, 2016)

- Edad del lubricante

La edad también afecta al lubricante. Aparte de la muestra de aceite nuevo para obtener la línea de base, el lubricante requiere de un muestreo más frecuente durante el primer 10% de su vida útil. Es válido si se utiliza un tipo de aceite nuevo o de otro fabricante. (Wright, 2016)

- Resultados del análisis del lubricante

Fundamentada en los resultados del análisis del aceite usado y de los límites establecidos para la elaboración del diagnóstico. Si los resultados se encuentran en escenarios diferentes a los rangos normales, las frecuencias deben acortarse con la finalidad de evaluar la tendencia de los resultados y verificar si las correcciones respectivas han surtido el efecto deseado. (Wright, 2016)

En base a los factores anteriormente mencionados, se estableció que los rangos funcionales para el desarrollo de la investigación fueran por horas de operación del motor (75, 130, 200 y 300) debido a que el vehículo se desplazaba un promedio de 4 kilómetros en 8 horas de trabajo y por el kilometraje recorrido del vehículo (1500, 2200, 3000 y 5000), debido a que la volqueta se desplazaba a la cantera de Pintag desde la ESPE Matriz en un promedio de 3 viajes al día aproximadamente 52 kilómetros por viaje.

### **2.13. Ley de Stokes**

Es la fuerza de fricción experimentada por objetos esféricos moviéndose en el fluido viscoso en un régimen laminar con un bajo número de Reynolds.

Es el principio usado en los viscosímetros de bola en caída libre, en los cuales el fluido está estacionario en un tubo vertical de vidrio y una esfera, de tamaño y densidad conocidas que desciende a través del líquido. El tiempo de caída puede ser medido mientras la esfera pasa entre dos marcas de un tubo. Conociendo las densidades de la esfera, el líquido y la velocidad de caída se puede calcular la viscosidad por medio del método de Stokes. (Dusenbery, 2009)

***Ecuación 20. Ley de Stokes***

$$v = \frac{2r^2 g(\rho_e - \rho_f)}{9\eta}$$

Donde:

*$\eta$ : Viscosidad dinámica del fluido*

*$v$ : Velocidad de caída de la esfera*

*$g$ : Gravedad*

*$\rho_e$ : Densidad de la esfera*

*$\rho_f$ : Densidad del fluido*

*$r$ : Radio de la esfera*

## CAPÍTULO III

### 3. ANÁLISIS DEL LUBRICANTE Y VEHÍCULO UTILIZADO

#### 3.1. Antecedentes del lubricante utilizado

Aceite PDV de PETROCOMERCIAL grado SAE 15W40 API CI-4

Lubricante de gran calidad, elaborado con Tecnología Amigable al Ambiente (TAA), desarrollado para ser utilizado en motores diésel modernos que poseen bajo índice de emisiones. Cumple los niveles de calidad API (Instituto Americano del Petróleo) para motores diésel y gasolina CI-4/SL, además de los anteriores: CH-4/ SJ, CG-4/SJ, CF-4/SH, CF/SG, CF y CF-2; cumpliendo los requisitos de lubricación de los motores de carga pesada europeos (ACEA E7-04, E5-02, E3-96#4 y B3-98#2).

Su excelente reserva alcalina le brinda al aceite PDV de PETROCOMERCIAL grado SAE 15W40 una gran capacidad para reducir el desgaste corrosivo al neutralizar los ácidos procedentes de la combustión, en especial en los casos donde el combustible utilizado posee un porcentaje elevado de azufre. (Petrocomercial, 2016)

Se recomienda el uso del aceite PDV grado SAE 15W40, principalmente para motores diésel de alta velocidad, de aspiración natural o sobrealimentados de reciente diseño (bajas emisiones) y que operan en condiciones severas de servicio, utilizados tanto en la industria del transporte comercial (camiones, autobuses), de la construcción y del agro (maquinarias pesadas/agrícolas) como en aplicaciones Industriales estacionarias. (Petrocomercial, 2016)

**Tabla 18.**  
**Características del aceite lubricante PDV**

<b>Aceite PDV grado SAE 15W40 API CI-4 de Petrocomercial</b>		
<b>Propiedades</b>	<b>Unidades</b>	<b>Valor Referencial</b>
Viscosidad @ 40°C	CSt	106
Viscosidad @ 100°C	CSt	14,5
Índice de Viscosidad		140
Viscosidad aparente, CCS	cP	6260
Viscosidad Temperatura	°C	-20
Número Básico Total	mg KOH/gr	10.0
Punto de Fluidez	°C	-24
Punto de Inflamación	°C	220
Densidad Relativa @ 15,6 °C		0,880
Categoría del servicio API		CI-4, CH-4, CG-4, CF-4, CF, SL
MACK		EO-M PLUS
VOLVO		VDS 3
ACEA		E7-04/E5-02 E3-96#4 B3-98#2
CUMMINS		CES 20078/77
DaimlerChrysler		MB p228.3
M.A.N.		3275

Fuente: (Petrocomercial, 2016)

Valores Base analizados del aceite lubricante PDV grado SAE 15W40.  
 Ver Anexo B. (Resultado aceite nuevo o línea base)

La Tabla 19. Línea base del TBN o BN del aceite lubricante PDV nuevo.

<b>Tabla 19.</b>	
<b>Línea Base del TBN aceite nuevo</b>	
<b>Número Total Base</b>	
<b>(mg KOH/gr)</b>	
TBN	10,5

La Tabla 20, muestra los valores base de los elementos de desgaste, contaminantes del aceite y del paquete de aditivos obtenidos de los resultados del análisis del aceite nuevo.

**Tabla 20.**  
**Conteo de partículas aceite nuevo**

<b>Conteo de partículas (ppm)</b>															
<b>Elementos de desgaste</b>						<b>Contaminantes del aceite</b>			<b>Aditivos</b>						
Cu	Fe	Cr	Al	Pb	Sn	Si	Na	K	Mo	Ni	V	Ca	Mg	Zn	P
0	2	0	3	0	0	3	3	0	0	0	0	2960	12	1169	1012

La Tabla 21, indica la línea base de la viscosidad cinemática del aceite nuevo.

<b>Tabla 21.</b>	
<b>Viscosidad aceite nuevo</b>	
<b>Viscosidad @ 100°C (cSt)</b>	
V100	14,5

La Tabla 22, indica los valores de línea base de la condición del aceite y de los posibles contaminantes inmersos en el lubricante nuevo.

**Tabla 22.**  
**Condición del aceite nuevo**

<b>Condición del aceite</b>						
<b>Condición del aceite (UFM)</b>			<b>Contaminantes del aceite (ppm)</b>			
Oxidación (OXI)	Nitración (NIT)	Sulfatación (SUL)	Hollín (ST)	Agua (W)	Anticongelante (A)	Combustible (F)
11	3	20	0	0	0	0

### **3.2. Análisis del lubricante PDV de PETROECUADOR grado SAE 15W40 CI4**

Los parámetros considerados para la evaluación del lubricante son:

- **Conteo de partículas:** Controla la limpieza y el desgaste abrasivo.
- **Condición del aceite:** Determina si el aceite está degradado, se observarán aspectos como la oxidación, nitración, sulfatación, hollín.
- **Viscosidad (V100):** Controla la película de aceite con respecto a la temperatura de operación.
- **TBN (Número Total Base):** Controla el potencial de corrosión.

El uso y manejo de un análisis de aceite ayudó a determinar posibles fallas o desperfectos mecánicos, evitando con ello tiempos muertos o paros innecesarios de la maquinaria utilizada, además de ello se pudo establecer un control de la eficacia y eficiencia que el lubricante brinda a la protección del motor de combustión interna, debido a que el lubricante posee sus propias características y ciclo de durabilidad.

### 3.3. Especificaciones técnicas del vehículo

La Tabla 23, muestra las especificaciones técnicas (nomenclaturas y significados del modelo MACK GU813E) y la capacidad de lubricante que el vehículo requiere en el sistema de lubricación.

**Tabla 23.**

**Especificaciones técnicas MACK GU813E**

**Especificaciones MACK GU813**

Nomenclatura	Significado	
G	Granite	
U	Ultra	
8	Tipo de chasis (independiente)	
1	Motor MACK	
3	Número de ejes	
Motor MP8-400C		
M	MACK	
P	Power	
8	13 lt	
400	400 hp	
C	Maxicruse	
Sistema de Lubricación		
Componente	Grado	Capacidad
Motor	15W40	9
Transmisión	85W140 / 80W90	4

### 3.4. Estado técnico del vehículo

Durante el proceso de inspección técnica del vehículo (Ver Anexo A. Ficha de revisión técnica de la volqueta MACK GU813E), autorizado para realizar el proyecto de investigación, se determinó que el vehículo se encontraba en buenas condiciones o en un rango de operación moderado, debido a que poseía ciertas fallas que no impedían su funcionamiento, dichas averías consistían en pequeñas fugas de aceite en el conjunto de los solenoides en la caja de cambios, fugas de aire en los ductos de conexión de los limpiaparabrisas, desperfectos en el caucho del árbol de transmisión, avería en la válvula del secador de aire ya que acumulaba mucha cantidad de agua en los tanques de aire.

Todos estos desperfectos fueron corregidos en el transcurso de la investigación, razón por la cual se puede asegurar que el vehículo utilizado en el seguimiento, paso de tener un rango de funcionamiento moderado a una operación óptima, con ello evitando paros innecesarios del automotor.

### 3.5. Prueba del Número Total Base (TBN)

Al usar el analizador determinado en la norma ASTM (D-974, 2004), ver Figura 6, se determinó el TBN o BN (Número Total Base), además puede determinar el pH, conocer la cantidad de volumen que se requiere para que una sustancia reaccione con una cierta cantidad de otra sustancia.



**Figura 6. Titrador Potenciométrico Analizador de TBN o BN**  
**Fuente: Caterpillar**

### 3.6. Prueba conteo de partículas

#### Análisis Espectrométrico

#### Norma ASTM D-5185

El análisis espectrométrico detallado en la norma ASTM (D-5185, 2009) permite obtener un informe cuantitativo de los elementos que se encuentran presentes en el aceite como resultado del desgaste producido a lo largo de la vida útil del lubricante. El análisis puede detectar partículas desde los 5 hasta los 10 micrómetros (um), con la ayuda de un espectrómetro ver Figura 7.



**Figura 7. Espectrómetro**  
**Fuente: Caterpillar**

La Tabla 24, indica la combinación de los elementos de desgaste (principal y secundario) con sus posibles fuentes y áreas probables de afectación.

**Tabla 24.**

#### Elementos de desgaste

#### Combinación de elementos de desgaste

Parte	Elemento principal	Elemento secundario	Desgaste posible	Causa o Área probable del problema
	Silicio (tierra)	Hierro, Cromo, Aluminio	Camisas, anillos, pistones	Sistema de entrada de aire/filtro contaminación con tierra

CONTINÚA



Culata	Hierro	Cromo, Aluminio	Camisas, anillos, pistones	Temperaturas anormales de operación, degradación del aceite, contaminación con refrigerante o combustible, anillos atascados o rotos
	Cromo	Molibdeno, Aluminio	Anillos, pistones	Gases de escape, consumo de aceite, degradación del aceite
	Hierro	--	Camisas, engranajes, tren de válvulas, cigüeñal	Temperaturas anormales de operación, falta de lubricación, contaminación, almacenamiento (herrumbre)
Bloque	Silicio (tierra)	Plomo, Aluminio	Cojinetes	Contaminación con tierra
	Plomo	Aluminio	Cojinetes	Falta de lubricación, contaminación con refrigerante, contaminación con combustible

### 3.7. Prueba de la viscosidad

#### Prueba de la viscosidad cinemática



**Figura 8. Viscosímetro CANNON**

**Fuente: Caterpillar**

La norma ASTM (D-445, 1965) establece los requisitos y parámetros para desarrollar la prueba que consiste en determinar la viscosidad cinemática del fluido a una temperatura de 100°C, con ello se podrá determinar si existe un incremento o descenso, normal o excesivo de la

viscosidad cuando el lubricante es expuesto a una cierto régimen de temperatura. Permite adicional determinar la viscosidad dinámica, detectar procesos severos de oxidación, rellenos inadecuados y contaminación existente en el lubricante.

### 3.8. Prueba de la condición de aceite

#### Espectrometría Infrarroja

La norma ASTM (E-2412, 2010), establece los requisitos para el desarrollo de la prueba de infrarrojo, la cual sirve para determinar si el aceite se encuentra degradado, así como conocer condiciones como: sulfatación, nitración y oxidación, además detecta la presencia de hollín considerado contaminante. El método de prueba tiene la ventaja de no exigir la identificación correcta del aceite nuevo antes de cada análisis.



**Figura 9. Espectrómetro de infrarrojo**  
**Fuente: Caterpillar**

Para poder determinar las condiciones del aceite lubricante existen dos métodos los cuales son la espectroscopia IR (infrarroja) y la espectroscopia por transformada de Fourier FTIR.

La espectroscopia IR (infrarroja)

Utiliza una lámpara incandescente calentada eléctricamente como fuente de radiación IR, y esta radiación es pasada a través de una muestra hacia el detector. Los constituyentes químicos de la muestra absorben algo de la luz IR en números de ondas reproducibles y específicos. (Noria, 2014)

El método implica el uso de un prisma de difracción para separar los números de ondas individualmente y luego detectarlos en un tiempo, a medida que pasan por la muestra, y graficar la absorbancia contra el número de onda. (Noria, 2014)

### Espectroscopia por transformadas de Fourier (FTIR)

El dispositivo utiliza un espejo móvil, cuya velocidad es monitoreada por un láser, que también actúa como una longitud de onda de referencia. El detector mide la suma de todas las frecuencias registradas en el tiempo dando como resultado un patrón de interferencia en función del tiempo llamado interferograma. (Noria, 2014)

Con ayuda del algoritmo matemático llamado transformada de Fourier se convierte la señal en un espectro de absorbancia. El resultado es comparado con un espectro de respaldo de la celda vacía para eliminar la contribución de los contaminantes atmosféricos como el CO<sub>2</sub> y el vapor de agua. (Noria, 2014)

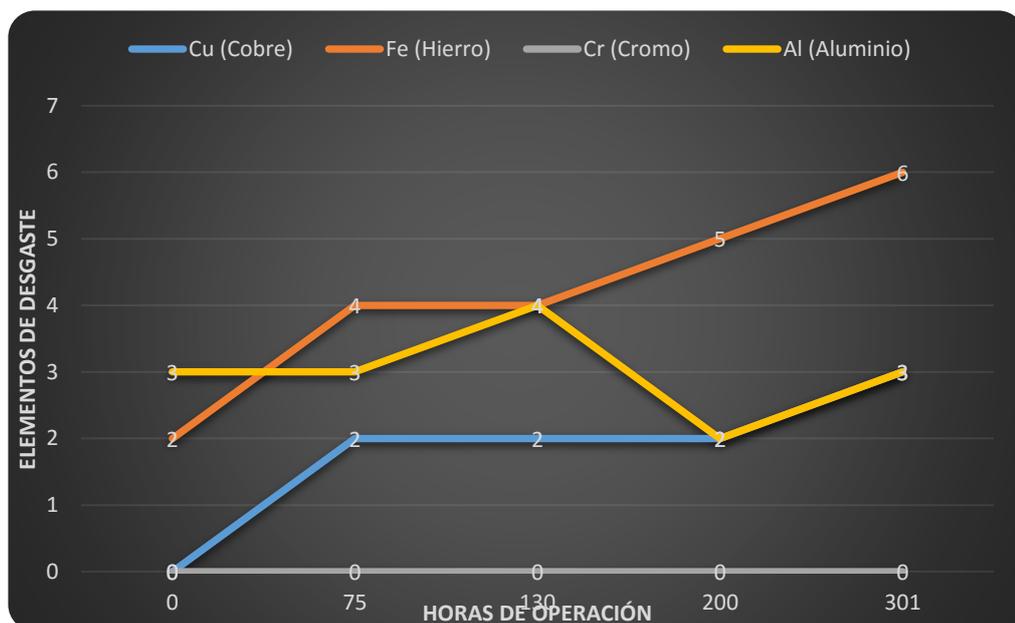
### **3.9. Análisis tribológico**

El análisis tribológico del aceite lubricante PDV grado SAE 15W40 de PETROCOMERCIAL, consiste en hacer énfasis a sus propiedades físico-químicas, las cuales constaron de pruebas como viscosidad cinemática y TBN (Número Total Base) esenciales si a lubricación se refiere, conteo de partículas de desgaste y paquete de aditivos; inmersos en el desgaste y fricción, todo esto abarca y cubrirá el análisis tribológico deseado; los valores de los elementos analizados varían sus rangos debido a causas asociados a muestras con impurezas, el problema más común es la entrada de burbujas de aire y gotas de agua, las cuales dispersan y bloquean la luz, proporcionando lecturas erróneas en los contadores ópticos automáticos, el código de contaminación sólida o código de niveles de limpieza establecido en la normativa (ISO4406, 1999), permite identificar la concentración

general de partículas sólidas en el lubricante; a continuación se presenta una serie de gráficas obtenidas durante la investigación, las cuales fueron elaboradas mediante el control de recorrido del vehículo y horas de operación del motor.

- Conteo de partículas de los elementos de desgaste en función del tiempo de operación del motor

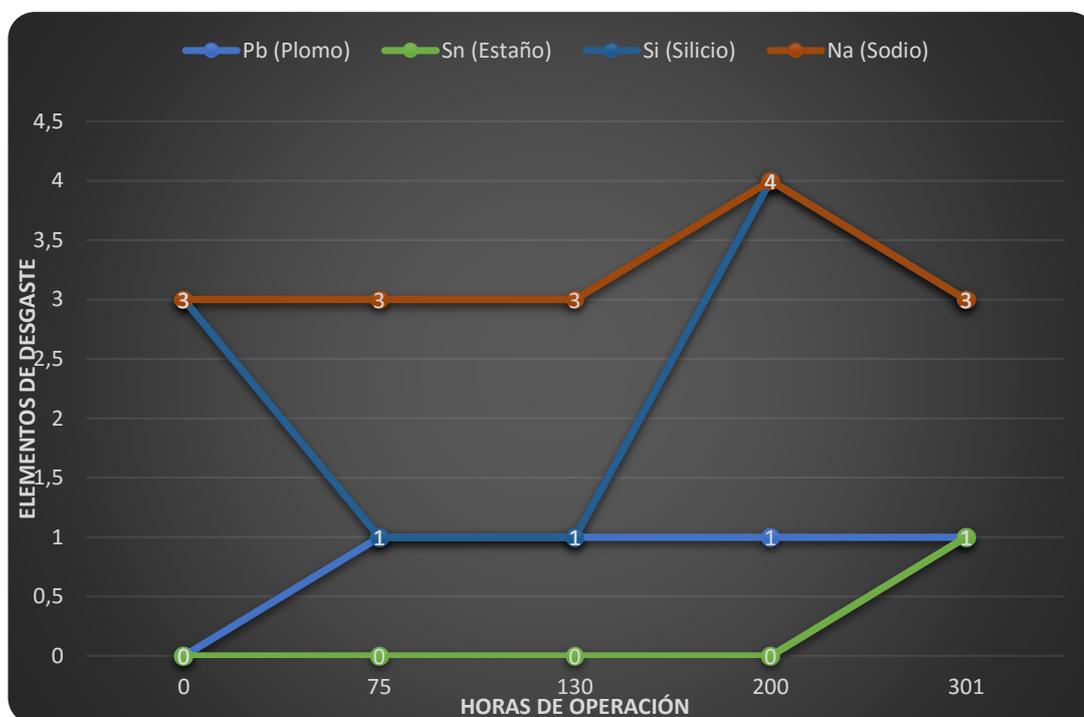
Como se observa en la Figura 10, el cobre (Cu) presenta un incremento de su valor base de 0 a 3 ppm en 301 horas de operación, el hierro (Fe) aumenta de 2 a 6 ppm al cumplir las horas de funcionamiento, el cromo (Cr) no presenta ningún cambio al cumplir las horas establecidas y el aluminio (Al) aumenta de 3 a 4 ppm en un lapso de 130 horas de operación para luego descender a 2 ppm y por último incrementar 3 ppm al cumplir las 301 horas de operación del motor.



**Figura 10. Elementos de Desgaste Cu, Fe, Cr, Al vs Horas de operación del motor**

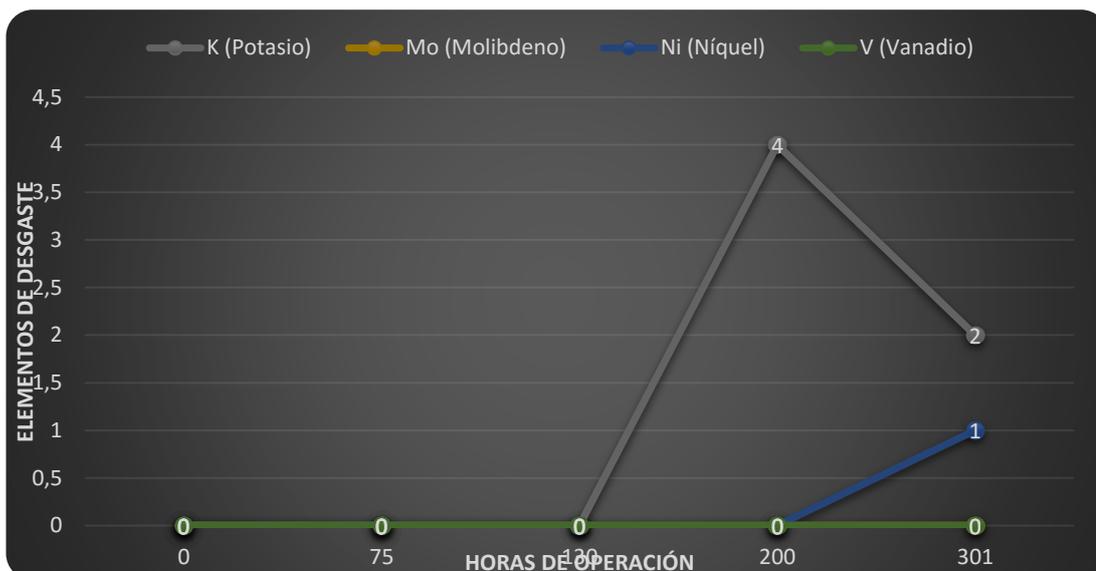
Como se muestra en la Figura 11, el plomo (Pb) presenta un aumento de 0 a 1 ppm al cumplir 301 horas de operación, el estaño (Sn) mantuvo constante su valor hasta las 200 horas, después de 101 horas incrementa de 0 a 1 ppm, el silicio (Si) presenta un descenso de 3 a 1 ppm luego un

incrementa a 4 ppm y se mantiene en 3 ppm al cumplir 301 horas y el sodio (Na) mantiene constante su valor base de 3 ppm hasta las 130 horas de funcionamiento luego aumenta a 4 ppm y por último desciende a 3 ppm al término de 301 horas de operación del motor.



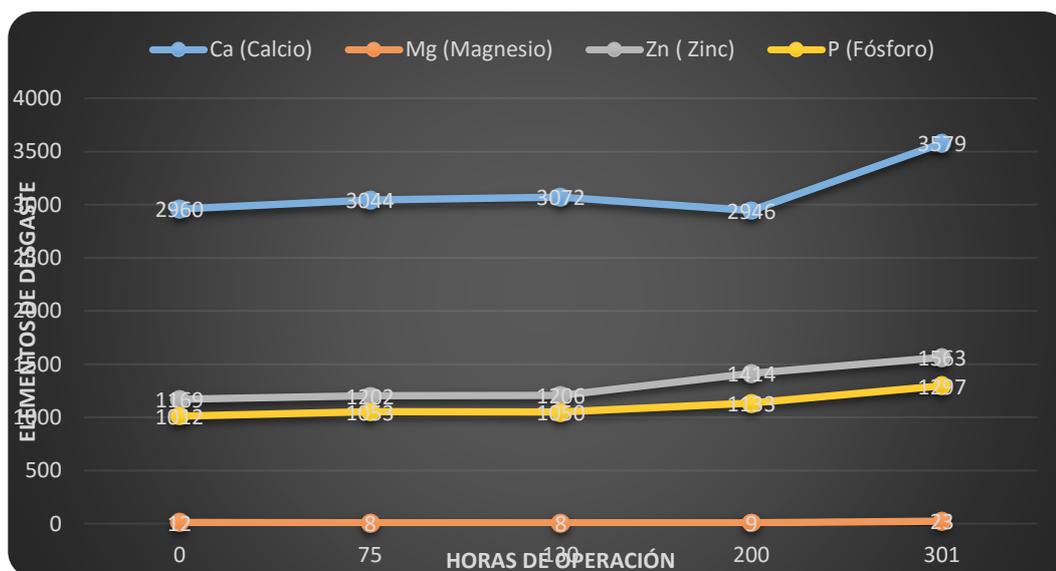
**Figura 11. Elementos de Desgaste Pb, Sn, Si, Na vs Horas de operación del motor**

La figura 12, indica los elementos de desgaste como: el potasio (K) el cual se mantiene constante hasta las 130 horas de operación con 0 ppm luego aumenta a 4 ppm a las 200 horas, por último desciende a 2 ppm al cumplir las 301 horas de funcionamiento, el molibdeno (Mo) y vanadio (V) se mantienen constantes con 0 ppm hasta cumplir con las 301 horas de operación y el níquel (Ni) es constante hasta las 200 horas con 0 ppm después de 101 horas asciende a 1 ppm.



**Figura 12. Elementos de Desgaste K, Mo, Ni, V vs Horas de operación del motor**

En la Figura 13, se analiza el comportamiento del paquete de aditivos conformado por: calcio (Ca) el cual presenta un aumento de 2960 a 3579 ppm al finalizar las horas de operación, el zinc (Zn) tiende a crecer su valor de 1169 a 1563 ppm al cumplir las 301 horas de operación, el fósforo (P) muestra una elevación de 1012 a 1197 ppm al termino de 301 horas de operación y el magnesio (Mg) se mantiene constante con un valor de 0 ppm al culminar las 301 horas de operación.



**Figura 13. Elementos de Desgaste "Aditivos" vs Horas de operación del motor**

- Condición del aceite

La Figura 14, enseña la concentración del hollín, el cual presenta un incremento en su valor base de 0 a 5 UFM al cumplir las 301 horas de operación del motor.



**Figura 14. Hollín (ST) vs Horas de operación del motor**

La figura 15, muestra la trayectoria que el agua presentó; manteniendo un comportamiento constante y nulo en cuanto a la presencia de contaminación en el aceite lubricante.



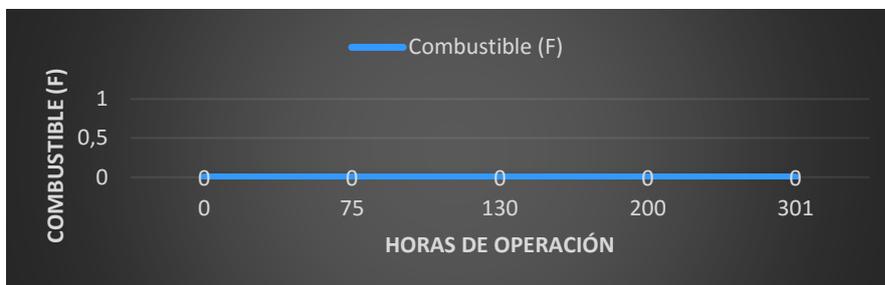
**Figura 15. Agua (W) vs Horas de operación del motor**

En la Figura 16, se aprecia la nula presencia del anticongelante en el aceite lubricante analizado.



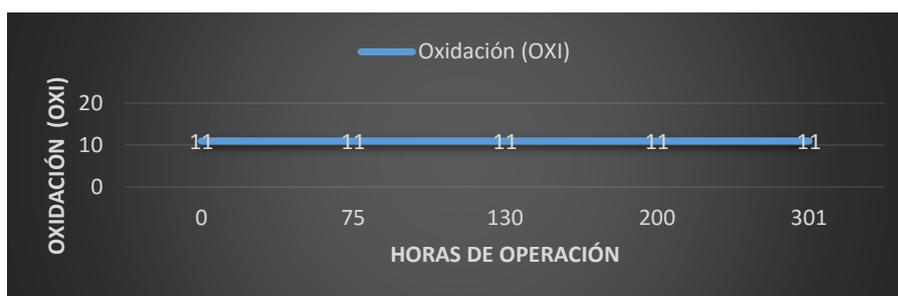
**Figura 16. Anticongelante (A) vs Horas de operación del motor**

En la figura 17, se indica la nula presencia del combustible como contaminante del aceite lubricante al cumplir las horas de operación del motor.



**Figura 17. Combustible (F) vs Horas de operación del motor**

La oxidación en el lubricante presenta un comportamiento constante de 11 UFM a lo largo de su análisis como se observa en la Figura 18.



**Figura 18. Oxidación (OXI) vs Horas de operación del motor**

La nitración en el lubricante presenta un leve incremento a partir de las 130 horas con un valor de 3 UFM a 4 UFM a las 301 horas de operación como se muestra en la Figura 19.



**Figura 19. Nitración (NIT) vs Horas de operación del motor**

En la Figura 20, analiza la interacción de la sulfatación desde su valor base de 20 UFM a 18 UFM al cumplir las 301 horas de operación del motor.



**Figura 20. Sulfatación (SUL) vs Horas de operación del motor**

- Viscosidad cinemática

El comportamiento de la viscosidad cinemática presenta un descenso desde su valor base de 14,5 cSt a 13,1 cSt al cumplir las 301 horas de operación como se indica en la Figura 21.



**Figura 21. Viscosidad vs Horas de Operación del motor**

- Número Total Base (TBN)

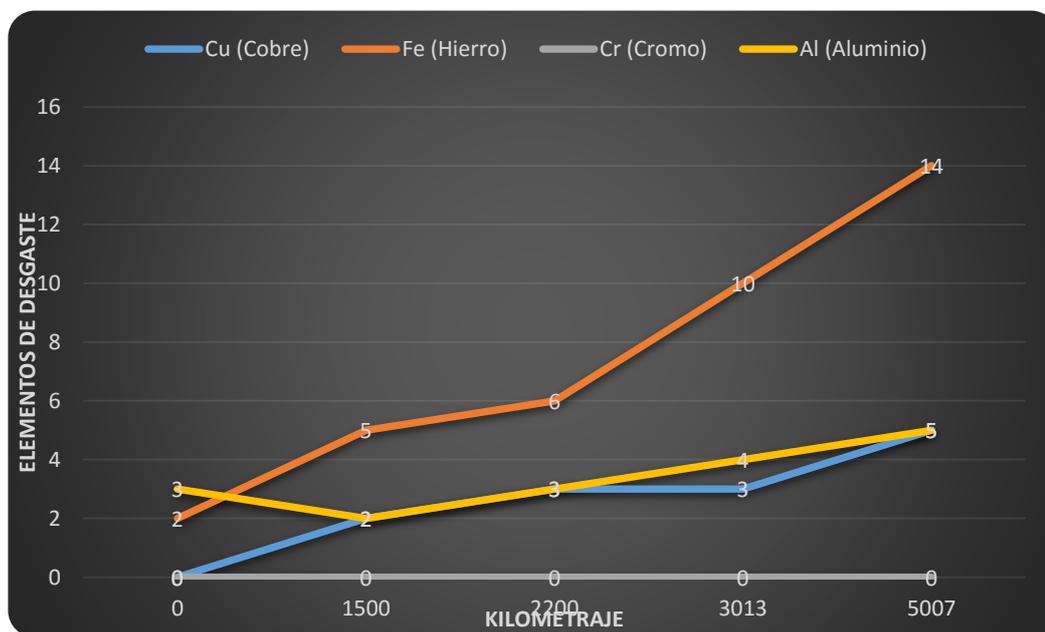
En la Figura 22, se aprecia el proceso de degradación que el Número Total Base (TBN) presentó desde su valor inicial de 10,5 a 9,5 mg KOH/gr obtenidos al cumplir las 301 horas de operación.



**Figura 22. Número Total Base (TBN) vs Horas de Operación del motor**

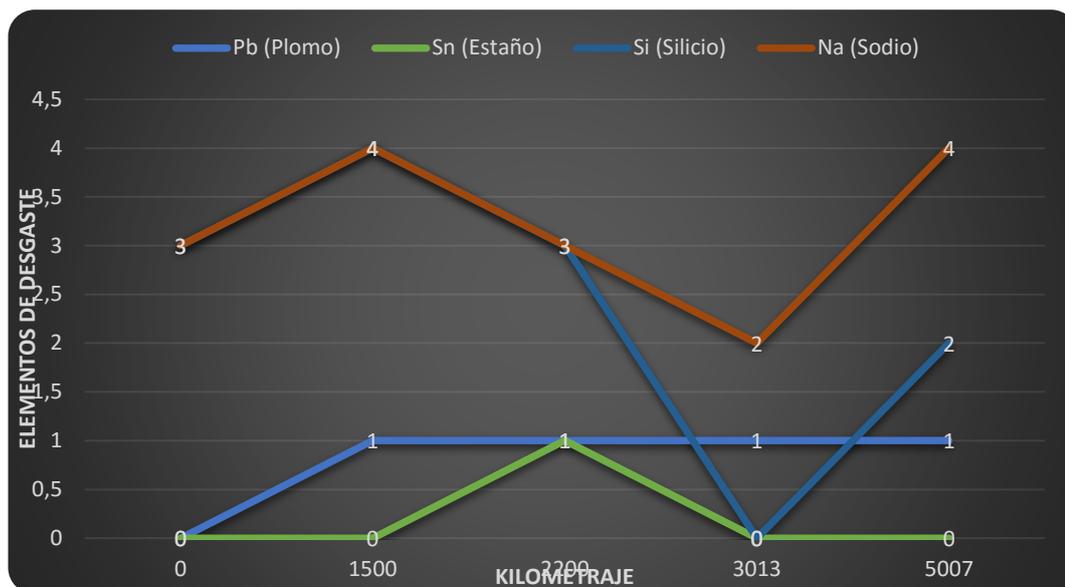
- Conteo de partículas de los elementos de desgaste en función del kilometraje recorrido por el vehículo.

Como se observa en la Figura 23, el cobre (Cu) demuestra un incremento desde su valor base de 0 a 5 ppm en el transcurso del kilometraje recorrido, el hierro (Fe) aumenta de 2 a 14 ppm al finalizar el recorrido a los 5007 kilómetros, el cromo (Cr) no presenta ningún cambio al cumplir el kilometraje útil y el aluminio (Al) demuestra un cambio de 3 a 5 ppm en 5007 kilómetros de recorrido.



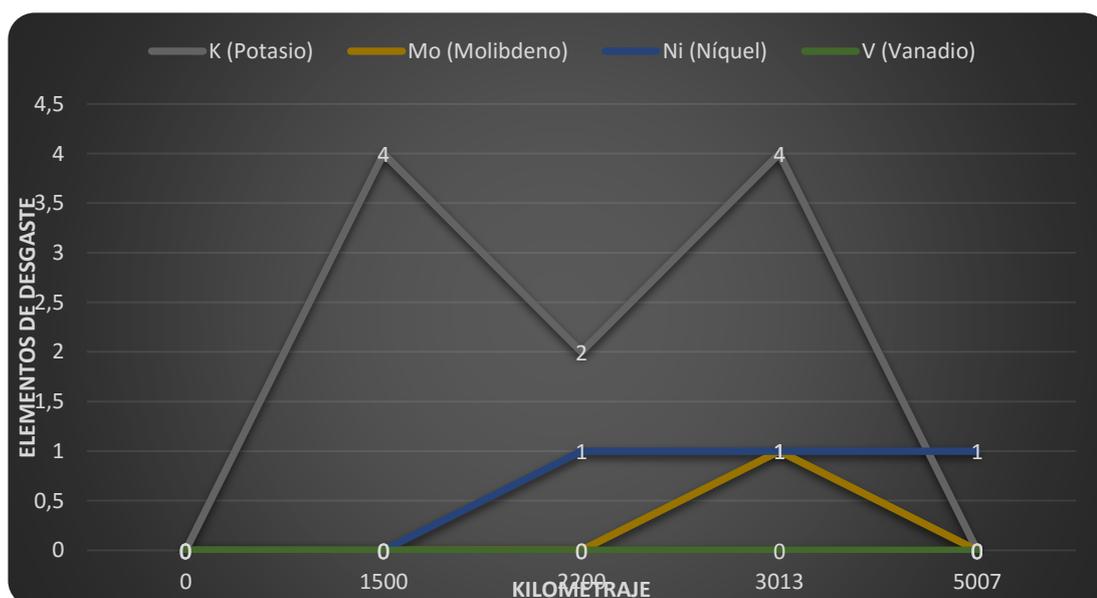
**Figura 23. Elementos de Desgaste Cu, Fe, Cr, Al vs Kilometraje recorrido**

En la Figura 24, se muestra el comportamiento del plomo (Pb) el cual presenta un cambio desde su valor base de 0 a 1 ppm siendo constante hasta cumplir los 5007 kilómetros de recorrido, el estaño (Sn) aumento en 1 ppm a los 2200 kilómetros luego desciende a 0 ppm hasta cumplir su recorrido útil, el silicio (Si) presenta una serie de variaciones desde su valor base de 3 a 0 ppm luego incrementa a 2 ppm al finalizar los 5007 kilómetros y el sodio (Na) muestra variaciones en sus valores llegando a tener un valor de 4 ppm al terminar los 5007 kilómetros de recorrido.



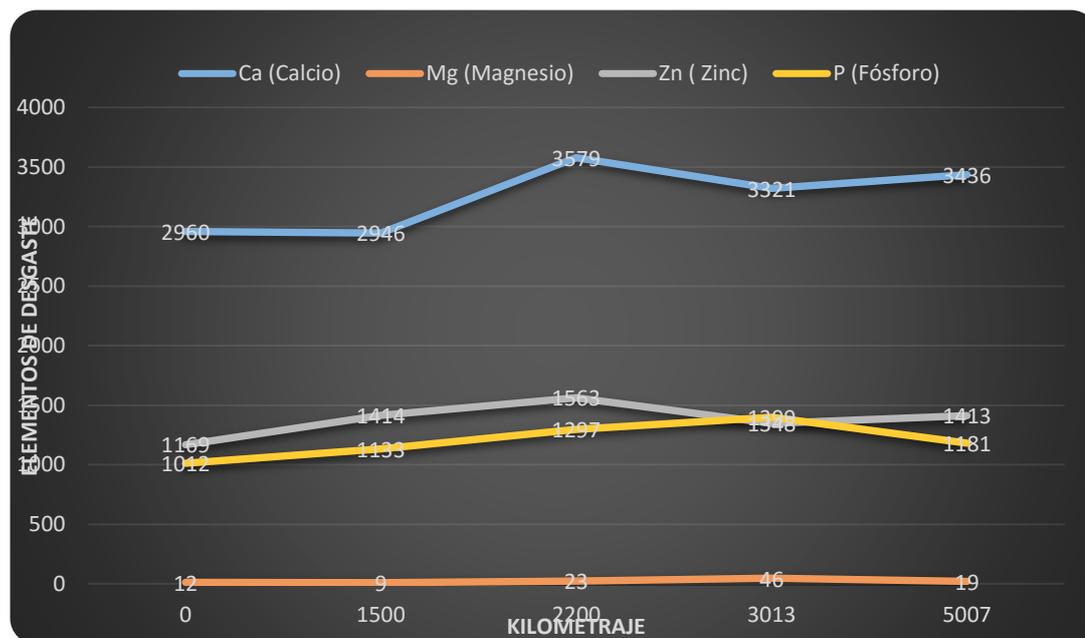
**Figura 24. Elementos de Desgaste Pb, Sn, Si, Na vs Kilometraje recorrido**

En la figura 25, los elementos de desgaste como el potasio (K) demostró variación en el valor base de 0 a 4 ppm, luego desciende a 2 ppm, aumenta a 4 ppm y luego disminuye a 0 ppm al cumplir con el kilometraje total, el molibdeno (Mo) presenta un cambio a 3013 kilómetros con un valor de 1 ppm para luego descender a 0 ppm a los 5007 kilómetros, el níquel (Ni) aumenta su valor a 1 ppm a los 2200 kilómetros manteniéndose constante hasta cumplir el kilometraje útil, el vanadio (V) se mantuvo constante con 0 ppm a lo largo del estudio realizado.



**Figura 25. Elementos de Desgaste K, Mo, Ni, V vs Kilometraje recorrido**

En la Figura 26, se indica la conducta del paquete de aditivos analizado de acuerdo al calcio (Ca) el cual aumento su valor base de 2960 a 3436 ppm a los 5007 kilómetros, el zinc (Zn) y fósforo (P) incrementaron su contenido de ppm al cumplir los 2200 kilómetros, descienden su cantidad de ppm al culminar los 5007 kilómetros y el magnesio (Mg) se mantuvo constante con un valor de 0 ppm al final de los 5007 kilómetros.



**Figura 26. Elementos de Desgaste "Aditivos" vs Kilometraje recorrido**

- Condición del aceite

En la Figura 27, se puede analizar la cantidad de hollín producida a lo largo del análisis realizado, el cual presentó una tendencia de incremento de 0 UFM a 11 UFM.



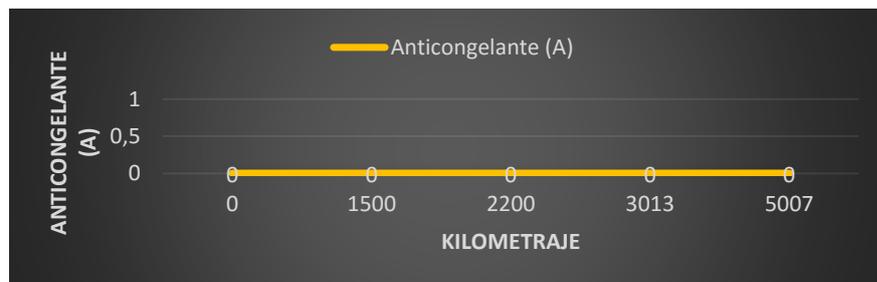
**Figura 27. Hollín (ST) vs Kilometraje recorrido**

En la figura 28, se observa el comportamiento del agua, la cual mantuvo un régimen constante y nulo a lo largo del análisis realizado.



**Figura 28. Agua (W) vs Kilometraje recorrido**

La figura 29, muestra la cantidad de anticongelante presente en el aceite lubricante, la cual se mantuvo constante y nula a lo largo de los 5007 kilómetros de recorrido.



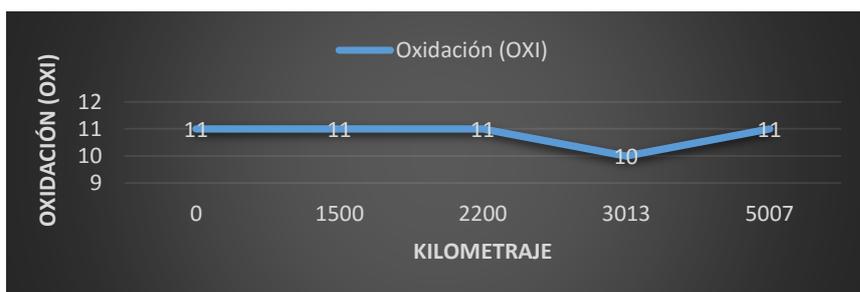
**Figura 29. Anticongelante (A) vs Kilometraje recorrido**

El combustible presenta un comportamiento nulo y constante en el aceite lubricante como se aprecia en la Figura 30.



**Figura 30. Combustible (F) vs Kilometraje recorrido**

La figura 31, indica la condición de oxidación, la cual se mantuvo constante con 11 UFM hasta los 2200 kilómetros, luego descendió levemente a 10 UFM y por último ascendió a los 11 UFM a los 5007 kilómetros de recorrido del vehículo.



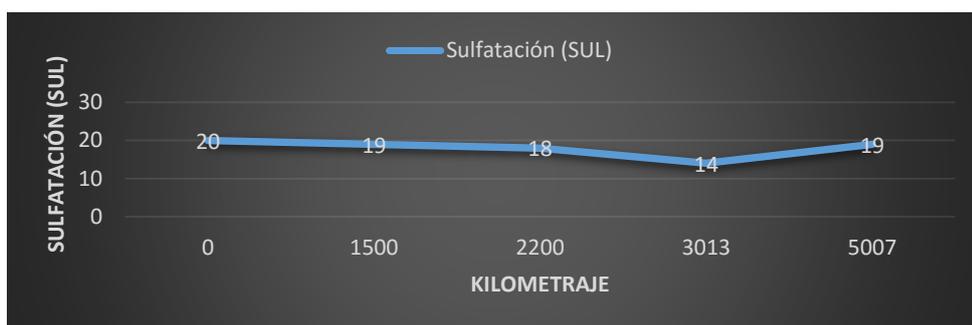
**Figura 31. Oxidación (OXI) vs Kilometraje recorrido**

La condición de nitración presenta un aumento leve desde su línea base de 3 a 5 UFM al culminar los 5007 kilómetros de recorrido del vehículo como se analiza en la Figura 32.



**Figura 32. Nitración (NIT) vs Kilometraje recorrido**

La sulfatación presenta un descenso desde su línea base de 20 a 14 UFM a los 3013 kilómetros, después asciende a 19 UFM al culminar los 5007 kilómetros de recorrido del vehículo como se observa en la Figura 33.



**Figura 33. Sulfatación (SUL) vs Kilometraje recorrido**

- Viscosidad cinemática

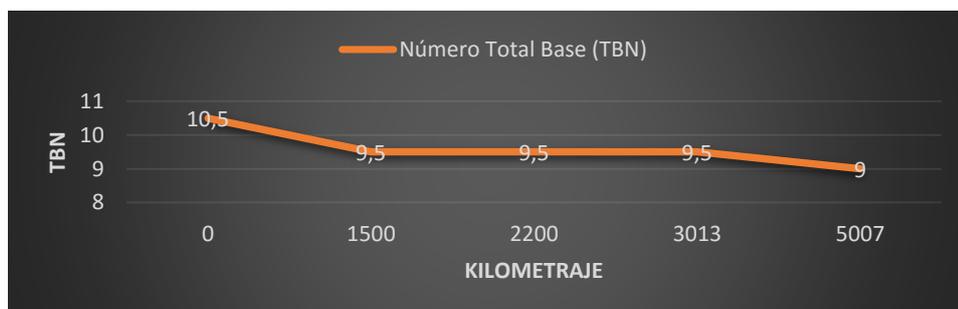
La viscosidad cinemática respecto al kilometraje presenta una degradación desde su valor base de 14,5 cSt a 12,5 cSt al cumplir los 5007 kilómetros de recorrido como se muestra en la Figura 34.



**Figura 34. Viscosidad vs Kilometraje recorrido**

- Número Total Base (TBN)

El Número Total Base desciende su valor base 10,5 mg KOH/gr a 9 mg KOH/gr al término de los 5007 kilómetros de recorrido como se aprecia en la Figura 35.



**Figura 35. Número Total Base (TBN) vs Kilometraje recorrido**

## CAPÍTULO IV

### 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### 4.1. Resultados de las muestras obtenidas del aceite usado PDV de PETROECUADOR (PETROCOMERCIAL) grado SAE 15W40

##### 4.1.1. Resultado del TBN (Número Total Base)

Ver Anexos C, D y E (Resultados de aceite usados)

Las Tabla 25, indica el comportamiento del TBN del aceite usado recolectado a las 75, 130, 200 y 301 horas de operación del motor, el cual se mantuvo constante hasta cumplir el tiempo de vida útil.

**Tabla 25.**  
**Resultados del TBN del aceite usado por horas de operación del motor**

	<b>Horas (hrs)</b>	<b>Número Total Base (mg KOH/ gr)</b>	
<b>Muestra 1</b>	75	TBN	9,5
<b>Muestra 2</b>	130	TBN	9,5
<b>Muestra 3</b>	200	TBN	9,5
<b>Muestra 4</b>	301	TBN	9,5

Las Tabla 26, muestra el comportamiento del TBN del aceite usado al término de 1500, 2200, 3013 y 5007 kilómetros de recorrido por el vehículo, en el cual se aprecia el deterioro que la propiedad del lubricante presenta.

**Tabla 26.**  
**Resultados del TBN del aceite usado por kilometraje recorrido**

	<b>Kilometraje (km)</b>	<b>Número Total Base (mg KOH/ gr)</b>	
<b>Muestra 3</b>	1500	TBN	9,5
<b>Muestra 4</b>	2200	TBN	9,5
<b>Muestra 5</b>	3013	TBN	9,5
<b>Muestra 6</b>	5007	TBN	9,0

#### 4.1.2. Resultado del Conteo de partículas

La Tabla 27, indica los resultados del conteo de partículas de los principales elementos de desgaste (Cu, Fe, Cr, Al, Pb, Sn) los cuales presentan un incremento desde su valor base hasta el término de la investigación y del paquete de aditivos (Mo, Ni, V, Ca, Mg, Zn, P) la cantidad de partículas por millón (ppm) de los aditivos incremento debido al proceso de combustión; dichas muestras fueron tomadas a las 75, 130, 200 y 301 horas de operación del motor,.

**Tabla 27.**

**Resultados del conteo de partículas del aceite usado por horas de operación del motor**

	Horas	Elementos de desgaste (ppm)						Paquete de aditivos (ppm)						
		Cu	Fe	Cr	Al	Pb	Sn	Mo	Ni	V	Ca	Mg	Zn	P
<b>Aceite Nuevo</b>	0	0	2	0	3	0	0	0	0	0	2960	12	1169	1012
<b>Muestra 1</b>	75	2	4	0	3	1	0	0	0	0	3044	8	1202	1053
<b>Muestra 2</b>	130	2	4	0	4	1	0	0	0	0	3072	8	1206	1050
<b>Muestra 3</b>	200	2	5	0	2	1	0	0	0	0	2946	9	1414	1133
<b>Muestra 4</b>	301	3	6	0	3	1	1	0	1	0	3579	23	1563	1297

La Tabla 28, muestra los resultados del conteo de partículas de los principales elementos de desgaste (Cu, Fe, Cr, Al, Pb, Sn) los cuales incrementaron sus valores desde la línea base por efecto del mismo deterioro interno de los elementos y el paquete de aditivos (Mo, Ni, V, Ca, Mg, Zn, P), cuya concentración y proporción tendió a aumentar debido al proceso de combustión interna; dichas muestras fueron recolectadas a los 1500, 2200, 3013 y 5007 kilómetros de recorrido del vehículo.

**Tabla 28.**  
**Resultados del conteo de partículas del aceite usado por kilometraje recorrido**

	Kilometraje (km)	Elementos de desgaste (ppm)						Paquete de aditivos (ppm)						
		Cu	Fe	Cr	Al	Pb	Sn	Mo	Ni	V	Ca	Mg	Zn	P
<b>Aceite Nuevo</b>	0	0	2	0	3	0	0	0	0	0	2960	12	1169	1012
<b>Muestra 3</b>	1500	2	5	0	2	1	0	0	0	0	2946	9	1414	1133
<b>Muestra 4</b>	2200	3	6	0	3	1	1	0	1	0	3579	23	1563	1297
<b>Muestra 5</b>	3013	3	10	0	4	1	0	1	1	0	3321	46	1348	1399
<b>Muestra 6</b>	5007	5	14	0	5	1	0	0	1	0	3436	19	1413	1181

#### 4.1.3. Resultado de la Viscosidad

La Tabla 29, contiene los resultados de la viscosidad cinemática del aceite usado, que tendió a descender gradualmente desde su valor inicial de 13,8 a 13,1 cSt; cuyas muestras fueron recolectadas a 75, 130, 200 y 301 horas de operación del motor.

**Tabla 29.**  
**Resultados de la viscosidad del aceite usado por horas de operación del motor**

	Horas (hrs)	Viscosidad @ 100°C (cSt)	
<b>Muestra 1</b>	75	V100	13,8
<b>Muestra 2</b>	130	V100	13,5
<b>Muestra 3</b>	200	V100	13,2
<b>Muestra 4</b>	301	V100	13,1

La Tabla 30, indica los resultados de la viscosidad cinemática del aceite usado recolectado a 1500, 2200, 3013 y 5007 kilómetros de recorrido del vehículo, dicha condición presentó un descenso de 13,2 a 12,5 cSt.

**Tabla 30.**  
**Resultados de la viscosidad aceite usado por kilometraje recorrido**

	<b>Kilometraje (km)</b>	<b>Viscosidad @ 100°C (cSt)</b>	
<b>Muestra 3</b>	1500	V100	13,2
<b>Muestra 4</b>	2200	V100	13,1
<b>Muestra 5</b>	3013	V100	12,5
<b>Muestra 6</b>	5007	V100	12,5

#### 4.1.4. Resultados de la Condición del aceite

La Tabla 31, contiene los resultados de la condición del aceite usado recolectado a 75, 130, 200 y 301 horas de operación del motor; indica el comportamiento de los parámetros de oxidación (OXI) la cual mantuvo constante su valor base de 11 UFM, nitración (NIT) presento un incremento de 3 a 4 UFM y sulfatación (SUL) descendió de 20 a 18 UFM a lo largo de la investigación desarrollada.

**Tabla 31.**  
**Resultados de la condición del aceite usado por horas de operación**

	<b>Condición del aceite (UFM)</b>			
	<b>Horas (hrs)</b>	<b>Oxidación (OXI)</b>	<b>Nitración (NIT)</b>	<b>Sulfatación (SUL)</b>
<b>Aceite Nuevo</b>	0	11	3	20
<b>Muestra 1</b>	75	11	3	20
<b>Muestra 2</b>	130	11	3	20
<b>Muestra 3</b>	200	11	4	19
<b>Muestra 4</b>	301	11	4	18

La Tabla 32, indica los resultados de la condición del aceite usado a 1500, 2200, 3013 y 5007 kilómetros de recorrido del vehículo; indica el comportamiento de los parámetros de oxidación (OXI) que mantuvo su valor base de 11 UFM, nitración (NIT) presento un incremento de 3 a 4 UFM y sulfatación (SUL) disminuyo de 20 a 19 UFM a lo largo de la investigación desarrollada.

**Tabla 32.****Resultados de la condición del aceite usado por kilometraje recorrido**

	<b>Condición del aceite (UFM)</b>			
	<b>Kilometraje (km)</b>	<b>Oxidación (OXI)</b>	<b>Nitración (NIT)</b>	<b>Sulfatación (SUL)</b>
<b>Aceite Nuevo</b>	0	11	3	20
<b>Muestra 3</b>	1500	11	4	19
<b>Muestra 4</b>	2200	11	4	18
<b>Muestra 5</b>	3013	10	4	14
<b>Muestra 6</b>	5007	11	4	19

En la Tabla 33, se observa los resultados del comportamiento de los contaminantes en el aceite usado (hollín, agua, anticongelante, combustible, silicio, sodio y potasio), tomados a 0, 75, 130, 200 y 301 horas de operación del motor; donde la presencia de dichos elementos degradantes es creciente pero baja debido al grado de deterioro que presenta el lubricante.

**Tabla 33.****Resultados de los contaminantes del aceite usado por horas de operación****Contaminantes del aceite (ppm)**

	<b>Hora s (hrs)</b>	<b>Hollín (ST) (UFM)</b>	<b>Agua (W)</b>	<b>Anticonge- lante (A)</b>	<b>Combu- stible (F)</b>	<b>Si</b>	<b>Na</b>	<b>K</b>
<b>Aceite Nuevo</b>	0	0	0	0	0	3	3	0
<b>Muestra 1</b>	75	1	0	0	0	1	3	0
<b>Muestra 2</b>	130	2	0	0	0	1	3	0
<b>Muestra 3</b>	200	3	0	0	0	4	4	4
<b>Muestra 4</b>	301	5	0	0	0	3	3	2

La Tabla 34, contiene los resultados de los contaminantes del aceite usado (hollín, agua, anticongelante, combustible, silicio, sodio y potasio) recolectados a 0, 1500, 2200, 3013 y 5007 kilómetros de recorrido del vehículo; la presencia de los elementos degradantes aumenta debido al deterioro normal que presentan los componentes y el aceite lubricante.

**Tabla 34.**  
**Resultado de los contaminantes del aceite usado por kilometraje recorrido**

<b>Contaminantes del aceite (ppm)</b>									
	<b>Kilometraje (km)</b>	<b>Hollín (ST) (UFM)</b>	<b>Agua (W)</b>	<b>Anticongelante (A)</b>	<b>Combustible (F)</b>	<b>Si</b>	<b>Na</b>	<b>K</b>	
<b>Aceite Nuevo</b>	0	0	0	0	0	3	3	0	
<b>Muestra 3</b>	1500	3	0	0	0	4	4	4	
<b>Muestra 4</b>	2200	5	0	0	0	3	3	2	
<b>Muestra 5</b>	3013	7	0	0	0	0	2	4	
<b>Muestra 6</b>	5007	11	0	0	0	2	4	0	

#### 4.2. Síntesis de resultados de las muestras obtenidas

- Conteo de partículas

La Tabla 35, corresponde al particulado de los elementos de desgaste (Sn, Fe, Al, Ni, Cu, Pb, Cr) tomados a las 75, 130, 200 y 301 horas de operación del motor, los resultados de cada elemento analizado se describe a continuación: estaño (Sn) cambio de 0 a 1 ppm, el hierro (Fe) aumento de 4 a 6 ppm, el aluminio (Al) mantuvo un valor promedio de 3 ppm, el níquel (Ni) tuvo un cambio de 0 a 1 ppm, el cobre (Cu) elevo su valor de 2 a 3 ppm, el plomo (Pb) conservo un valor promedio de 1 ppm y el cromo (Cr) no cambio su valor base de 0 ppm; en función a los valores permisibles se puede establecer que el desgaste producido en el motor es normal y que la presencia principal de hierro (Fe) indica un desgaste posible en las camisas, tren de válvulas y cigüeñal, como posibles causas tenemos temperaturas anormales o lubricación inadecuada; la presencia de plomo (Pb) y aluminio (Al) sugieren desgaste en los cojinetes por problemas de lubricación.

**Tabla 35.****Valores permisibles en el conteo de partículas del aceite usado por horas de operación del motor**

<b>Propiedad Metales (ppm)</b>	<b>Método</b>	<b>Valor permisible (ppm)</b>	<b>Resultados aceite usado (75 hrs)</b>	<b>Resultados aceite usado (130 hrs)</b>	<b>Resultados aceite usado (200 hrs)</b>	<b>Resultados aceite usado (301 hrs)</b>
Sn		10	0	0	0	1
Fe		100	4	4	5	6
Al	Espectrometría de Emisión Atómica	20	3	4	2	3
Ni		5	0	0	0	1
Cu		15	2	2	2	3
Pb		100	1	1	1	1
Cr		40	0	0	0	0

- Paquete de aditivos

Cálculos de límites de precaución y límites críticos de los aditivos en el lubricante según la Norma ASTM D-5185.

La Tabla 36, indican los resultados del paquete de aditivos conformado por calcio (Ca), magnesio (Mg), zinc (Zn) y fósforo (P), de las muestras del aceite usado recolectado a 75, 130, 200 y 301 horas de operación del motor, donde se aprecia el aumento de sus valores base donde el calcio (Ca) incremento de 2960 a 3579 ppm, el magnesio (Mg) presento un valor promedio de 12 ppm, el zinc (Zn) aumento de 1169 a 1563 ppm y el fósforo (P) incremento de 1012 a 1297 ppm del paquete de aditivos al término de las 301 horas de operación del motor, mediante la comparación con los límites de precaución y crítico superior, se establece que el incremento de sus valores nominales son causados por la degradación en la propiedad antiespumante por problemas de liberación del aire y por el agente detergente deteriorado o inefectivo, así como también por un mayor contenido de cenizas sulfatadas.

**Tabla 36.****Límites críticos y de precaución en el pack de aditivos del aceite usado por horas de operación del motor**

<b>Pack de Aditivos (ppm)</b>	<b>Ca (Calcio)</b>	<b>Mg (Magnesio)</b>	<b>Zn (Zinc)</b>	<b>P (Fósforo)</b>
Aceite Nuevo o Línea Base (LB)	2960	12	1169	1012
Límite de Precaución Superior (LB-10%)	2664	10,8	1052,1	910,8
Límite Crítico Superior (LB-25%)	2220	9	876,75	759
Resultado de aceite usado (75 horas)	3044	8	1202	1053
Resultado de aceite usado (130 horas)	3072	8	1206	1050
Resultado de aceite usado (200 horas)	2946	9	1414	1133
Resultado de aceite usado (301 horas)	3579	23	1563	1297

Cálculos de los límites de precaución y límites críticos de la condición del lubricante según la Norma ASTM E-2412.

La Tabla 37, indica los rangos de los límites de precaución superior y límite crítico superior de las condiciones del aceite usado oxidación (OXI), sulfatación (SUL) y nitración (NIT); dichas condiciones presentaron el siguiente comportamiento: oxidación (OXI) no demostró ningún cambio al mantenerse con 11 UFM, la nitración (NIT) aumento de 3 a 4 UFM y la sulfatación (SUL) mantuvo un valor promedio de 19 UFM; determinando que no existió problemas asociados a la aparición de oxígeno y por consiguiente al deterioro del fluido mineral, en cuanto a problemas por la presencia de

nitración, el aceite tiende a saturarse con compuestos de óxidos de nitrógeno, los inconvenientes de la sulfatación son en especial al atacar a los aditivos con azufre (inhibidores de corrosión); revelando las posibles causas de la contaminación y por ende de problemas asociados a la degradación del aceite lubricante por mala combustión, una mezcla estequiométrica (aire/combustible) inadecuada, daños en los anillos de los pistones del motor, altas temperaturas, humedad en el aire o el aceite, presencia de metales catalizadores (elementos de desgaste).

**Tabla 37.**

**Límites críticos y de precaución de la condición del aceite usado por horas de operación del motor**

<b>Condiciones del Aceite (UFM)</b>			
	<b>Oxidación</b>	<b>Nitración</b>	<b>Sulfatación</b>
Aceite Nuevo o Línea Base (LB)	11	3	20
Límite de Precaución Superior (LB+15)	26	18	35
Límite Crítico Superior (LB+20)	31	23	40
Resultado aceite usado (75 horas)	11	3	20
Resultado aceite usado (130 horas)	11	3	20
Resultado aceite usado (200 horas)	11	4	19
Resultado aceite usado (301 horas)	11	4	18

- Viscosidad cinemática

Cálculo de límites de precaución y límites críticos de la viscosidad del lubricante según Norma ASTM D-445.

En la Tabla 38, se observa el seguimiento de la viscosidad cinemática del lubricante de acuerdo a las horas de operación del motor (75, 130, 200 y 301), determinando que dicha propiedad disminuyó de 14,5 a 13,1 cSt representando un 9,66% de degradación la cual tiende a aproximarse al límite crítico inferior, determinado que el aceite al sobrepasar las

300 horas de funcionamiento puede llegar a perder su viscosidad idónea; los problemas que causan el deterioro de esta propiedad del lubricante son ruptura permanente del mejorador del índice de viscosidad y por altas temperaturas, los problemas asociados con la oxidación se descartan porque la viscosidad debería tender a incrementar.

**Tabla 38.**

**Límites críticos y de precaución de la viscosidad cinemática del aceite usado por horas de operación del motor**

<b>Viscosidad @ 100°C (cSt)</b>	
<b>Aceite Nuevo o Línea Base (LB)</b>	<b>14,5</b>
Límite Precaución Inferior (LB-5%)	13,78
Límite Precaución Superior (LB+10%)	15,95
Límite Crítico Inferior (LB-10%)	13,05
Límite Crítico Superior (LB+20%)	17,4
Límite superior SAE J300	<16,3
Límite inferior SAE J300	12,5
Resultado aceite usado (75 horas)	13,8
Resultado aceite usado (130 horas)	13,5
Resultado aceite usado (200 horas)	13,2
Resultado aceite usado (301 horas)	13,1

- Número Total Base (TBN)

Cálculo de límites de precaución y límites críticos de la viscosidad del lubricante según Norma ASTM D-974.

La Tabla 39, contiene los datos obtenidos del TBN al cumplir con las horas de operación del motor (75, 130, 200 y 301), determinando que el BN descendió de 10,5 a 9,5 mg KOH/gr representando un 9,52% de degradación, el cual se encuentra por encima de los límites críticos y de precaución inferior, analizando que la reserva alcalina que el TBN posee

al cumplir las horas de operación establecidas es adecuada para que el lubricante siga en funcionamiento; descartando problemas por un alto contenido de azufre en el combustible, incorrecta combustión, excesivo paso de gases al cárter, contaminación con hollín, intervalos de cambio de aceite extendidos.

**Tabla 39.**

**Límites críticos y de precaución del TBN del aceite usado por horas de operación del motor**

**TBN (Número Total Base) (mg KOH/gr)**

Aceite Nuevo o Línea Base (LB)	Límite Precaución Inferior (50% de la LB)	Límite Crítico Inferior (20% de la LB)	Resultado muestra de aceite usado (75 hrs)	Resultado muestra de aceite usado (130 hrs)	Resultado muestra de aceite usado (200 hrs)	Resultado muestra de aceite usado (301 hrs)
10,5	5,25	2,1	9,5	9,5	9,5	9,5

- Conteo de partículas por kilometraje recorrido

La Tabla 40, indica los valores correspondientes al particulado de los elementos de desgaste (Sn, Fe, Al, Ni, Cu, Pb, Cr) tomados a las 1500, 2200, 3013 y 5007 kilómetros de recorrido del vehículo, los resultados de cada elemento analizado se describe a continuación: estaño (Sn) cambio de 0 a 1 ppm, el hierro (Fe) aumento de 5 a 14 ppm, el aluminio (Al) incremento de 2 a 5 ppm, el níquel (Ni) tuvo un cambio de 0 a 1 ppm, el cobre (Cu) elevo su valor de 2 a 5 ppm, el plomo (Pb) conservo un valor promedio de 1 ppm y el cromo (Cr) no cambio su valor de 0 ppm; en función a los valores permisibles se establece que el desgaste producido en el motor es normal y que la presencia de hierro (Fe), cobre (Cu) y aluminio (Al) sugiere como posibles fuentes de desgaste las camisas del pistón, faldas del pistón de aluminio, anillos del pistón, tren de válvulas y cigüeñal; como posibles causas temperaturas anormales o falta de lubricación; la presencia de plomo (Pb) y aluminio (Al) indican desgaste en los cojinetes de biela y bancada por una incorrecta lubricación.

**Tabla 40.**  
**Valores permisibles en el conteo de partículas del aceite usado por kilometraje recorrido**

Propiedad Metales (ppm)	Método	Valor permisible (ppm)	Resultados aceite usado (1500 km)	Resultados aceite usado (2200 km)	Resultados aceite usado (3013 km)	Resultados aceite usado (5007 km)
Sn		10	0	1	0	0
Fe	Espectrometría de Emisión	100	5	6	10	14
Al		20	2	3	4	5
Ni	Atómica	5	0	1	1	1
Cu		15	2	3	3	5
Pb		100	1	1	1	1
Cr		40	0	0	0	0

- Paquete de aditivos

Cálculo de límites de precaución y límites críticos de los aditivos en el lubricante según Norma ASTM D-5185

En la Tabla 41, se aprecia los resultados del paquete de aditivos conformado por el calcio (Ca), magnesio (Mg), zinc (Zn) y fósforo (P), obtenidas de las muestras del aceite usado que fue recolectado a 1500, 2200, 30130 y 5007 kilómetros de recorrido, donde se observa el aumento de los valores base del paquete de aditivos donde el calcio (Ca) incremento de 2960 a 3436 ppm, el magnesio (Mg) presento un valor promedio de 24 ppm, el zinc (Zn) aumento de 1169 a 1413 ppm y el fósforo (P) incremento de 1012 a 1181 ppm al término del kilometraje recorrido por el vehículo, determinando las posibles causas relacionados con los incrementos de los valores del paquete de aditivos por acción de la degradación en las propiedades del agente antiespumante deteriorado o inefectivo y también por un mayor contenido de cenizas sulfatadas.

**Tabla 41.**  
**Límites críticos y de precaución en el pack de aditivos del aceite usado por kilometraje recorrido**

Elementos de desgaste (ppm)	Ca	Mg	Zn (Zinc)	P (Fósforo)
	(Calcio)	(Magnesio)		
Aceite Nuevo o Línea Base (LB)	2960	12	1169	1012
Límite de Precaución Superior (LB-10%)	2664	10,8	1052,1	910,8
Límite Crítico Superior (LB-25%)	2220	9	876,75	759
Resultado de aceite usado (1500 km)	2946	9	1414	1133
Resultado de aceite usado (2200 km)	3579	23	1563	1297
Resultado de aceite usado (3013 km)	3321	46	1348	1399
Resultado de aceite usado (5007 km)	3436	19	1413	1181

- Condición del aceite

Cálculo de límites de precaución y límites críticos de la condición del lubricante según Norma ASTM E-2412

La Tabla 42, contiene los resultados del análisis de las muestras del aceite usado recolectado de acuerdo al kilometraje recorrido por el vehículo (1500, 2200, 3013 y 5007); referente a las condiciones de oxidación (OXI), sulfatación (SUL) y nitración (NIT); donde cada condición presento el siguiente comportamiento: oxidación (OXI) no demostró ningún cambio al mantenerse con 11 UFM, la nitración (NIT) aumento de 3 a 5 UFM y la sulfatación (SUL) mantuvo un valor

promedio de 18 UFM; determinando que no existió problemas asociados a la aparición de oxígeno y por consiguiente al deterioro del fluido mineral, en cuanto a problemas por la presencia de nitración el aceite tiende a saturarse con compuestos de óxidos de nitrógeno (NOx), los inconvenientes de la sulfatación son al atacar a los aditivos con azufre (inhibidores de corrosión); además los parámetros permanecen entre los rangos sugeridos por los límites de precaución superior y límite crítico superior, por lo tanto la degradación del aceite lubricante es limitado por problemas de mala combustión, una mezcla estequiométrica inadecuada, presencia de metales catalizadores (elementos de desgaste) o por daños en los anillos de los pistones del motor.

**Tabla 42.**  
**Límites críticos y de precaución de la condición del aceite usado por kilometraje recorrido**

	<b>Condiciones del Aceite (UFM)</b>		
	<b>Oxidación</b>	<b>Nitración</b>	<b>Sulfatación</b>
Aceite Nuevo o Línea Base (LB)	11	3	20
Límite de Precaución Superior (LB+15)	26	18	35
Límite Crítico Superior (LB+20)	31	23	40
Resultado aceite usado (1500 km)	11	4	19
Resultado aceite usado (2200 km)	11	4	18
Resultado aceite usado (3013 km)	11	4	14
Resultado aceite usado (5007 km)	11	5	19

- Viscosidad cinemática

Cálculo de límites de precaución y límites críticos de la viscosidad del lubricante según Norma ASTM D-445.

La Tabla 43, muestra el seguimiento de la viscosidad cinemática del lubricante de acuerdo al kilometraje recorrido por el vehículo (1500, 2200, 3013 y 5007), determinando que dicha propiedad disminuyo de 14,5 a 12,5 cSt representando un 13,79% de degradación la desciende por debajo del límite crítico inferior al cumplir su vida útil; los problemas que causan el deterioro de esta propiedad del aceite lubricante son ruptura permanente del mejorador del índice de viscosidad y altas temperaturas.

**Tabla 43.**  
**Límites críticos y de precaución de la viscosidad del aceite usado por kilometraje recorrido**

<b>Viscosidad @ 100°C (cSt)</b>	
Aceite Nuevo o Línea Base (LB)	14,5
Límite Precaución Inferior (LB-5%)	13,78
Límite Precaución Superior (LB+10%)	15,95
Límite Crítico Inferior (LB-10%)	13,05
Límite Crítico Superior (LB+20%)	17,4
Límite superior SAE J300	<16,3
Límite inferior SAE J300	12,5
Resultado aceite usado (1500 km)	13,2
Resultado aceite usado (2200 km)	13,1
Resultado aceite usado (3013 km)	12,5
Resultado aceite usado (5007 km)	12,5

- Número Total Base (TBN)

Cálculo de límites de precaución y límites críticos de la viscosidad del lubricante según Norma ASTM D-974.

La Tabla 44, indica los valores obtenidos del TBN de las muestras recolectadas a 1500, 2200, 3013 y 5007 kilómetros de recorrido del vehículo, determinando que el BN descendió de 10,5 a 9 mg KOH/gr representando un 14,29% de deterioro del lubricante, el cual se encuentra por encima de los límites críticos inferior y límite de precaución inferior, obteniendo que la reserva alcalina que el TBN posee al cumplir el kilometraje deseado es adecuado para que el lubricante siga en funcionamiento; descartando problemas por un alto contenido de azufre en el combustible, incorrecta combustión, excesivo paso de gases al cárter, contaminación con hollín.

**Tabla 44.**

**Límites críticos y de precaución del TBN del aceite usado por kilometraje recorrido**

<b>TBN (Número Total Base) (mg KOH/gr)</b>						
Aceite Nuevo o Línea Base (LB)	Límite Precaución Inferior (50% de la LB)	Límite Crítico Inferior (20% de la LB)	Resultado muestra de aceite usado (1500 km)	Resultado muestra de aceite usado (2200 km)	Resultado muestra de aceite usado (3013 km)	Resultado muestra de aceite usado (5007 km)
10,5	5,25	2,1	9,5	9,5	9,5	9

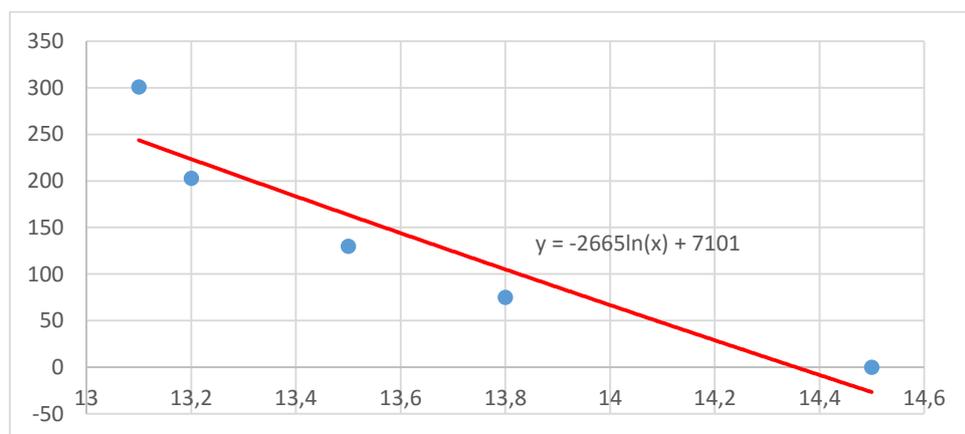
- Cálculo de tendencia logarítmica de la viscosidad cinemática

A continuación se presenta el cálculo de la tendencia de la viscosidad cinemática para poder determinar la hora de operación hasta la cual el lubricante es apto para mantener un rendimiento óptimo en el motor de acuerdo a la norma SAE J300, la cual establece que para un lubricante 15W40 los rangos de operatividad son de (12,5 a <16,3) cSt.

**Tabla 45.**  
**Tabla de valores de la tendencia**

Viscosidad	Horas de operación del motor
14,5	0
13,8	75
13,5	130
13,2	203
13,1	301
<b>12,5</b>	<b>370</b>
12,5	450
12,5	652

Al realizar la proyección de la tendencia con la ayuda de Excel se obtiene la siguiente ecuación, como se indica en la Figura 36:



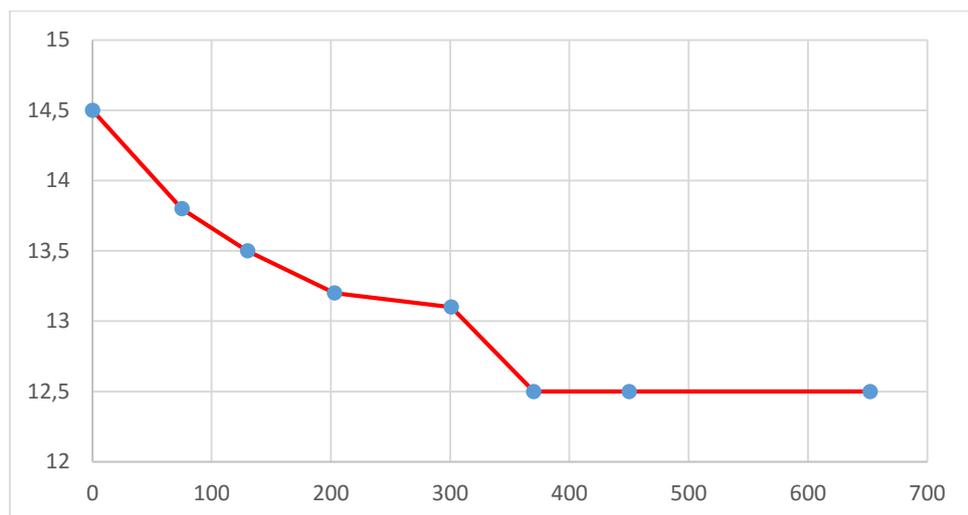
**Figura 36. Tendencia de las horas de operación del motor en función a la Viscosidad cinemática**

Reemplazando el valor mínimo de 12,5 cSt en la ecuación se obtendrá la hora de operación a la cual el lubricante deja de ser apropiado para seguir en funcionamiento.

$$y = -2665 \ln(12,5) + 7101$$

$$y = 369,93 \text{ horas}$$

Obteniendo un valor de  $369,93 \approx 370$  horas de operación del motor a las cuales el lubricante llega al margen mínimo establecido por la SAE J300; determinando que el aceite debe ser monitoreado con mayor frecuencia a partir de ese punto; se deberá realizar un cambio del aceite para poder prevenir fallas producidas por pérdida de la viscosidad cinemática.



**Figura 37. Tendencia de la viscosidad cinemática en función a las horas de operación del motor**

### 4.3. Cálculo experimental de la Ley de Stokes

Antes de proceder con la experimentación se debe establecer las condiciones iniciales de la ley de Stokes, la cual no considera la temperatura a la cual el fluido se encuentra, pero requiere de condiciones como masas, volúmenes, densidades de la esfera, probetas y de los fluidos a investigar.

Datos:

$$m_e = 0,005 \text{ kg}$$

$$m_{AN} = 0,015 \text{ kg}$$

$$m_{AU} = 0,015 \text{ kg}$$

$$r_e = \frac{D_e}{2} = \frac{10 \text{ mm}}{2} = 5 \text{ mm} = 0,005 \text{ m}$$

$$V_{AN} = 16 \text{ ml} = 0,000016 \text{ m}^3$$

$$V_{AU} = 16 \text{ ml} = 0,000016 \text{ m}^3$$

$$V_e = \frac{4}{3}\pi r_e^3 = \frac{4}{3}\pi(0,005 \text{ m})^3 = 5,235987756 \times 10^{-7} \text{ m}^3$$

Cálculo de densidades de los fluidos a ser analizados y de la esfera metálica

Se requiere hacer uso de las condiciones como masas y volúmenes de los fluidos a ser analizados y de la esfera empleada como patrón de medición.

$$\rho_{AN} = \frac{m_{AN}}{V_{AN}}$$

$$\rho_{AN} = \frac{0,015 \text{ kg}}{0,000016 \text{ m}^3}$$

$$\rho_{AN} = 937,5 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\rho_{AU} = \frac{m_{AU}}{V_{AU}}$$

$$\rho_{AU} = \frac{0,015 \text{ kg}}{0,000016 \text{ m}^3}$$

$$\rho_{AU} = 937,5 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\rho_e = \frac{m_e}{V_e}$$

$$\rho_e = \frac{0,005 \text{ kg}}{5,235987756 \times 10^{-7} \text{ m}^3}$$

$$\rho_e = 9549,296585 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Cálculo de la viscosidad dinámica del aceite nuevo y usado

Se emplea la ecuación de la ley de Stokes en donde se despeja la viscosidad dinámica y se procede a reemplazar los valores obtenidos anteriormente.

$$\eta_{AN} = \frac{2 \cdot r_e^2 \cdot g (\rho_e - \rho_{AN})}{9 \cdot v_{AN}}$$

$$\eta_{AN} = \frac{2 \cdot (0,005 \text{ m})^2 (9,81 \text{ m/s}^2) (9549,296585 \text{ kg/m}^3 - 937,5 \text{ kg/m}^3)}{9 \cdot (0,037542662 \text{ m/s})}$$

$$\eta_{AN} = 12,50158856 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

$$\eta_{AN} = 12501,58856 \text{ cP}$$

$$\eta_{AU} = \frac{2 \cdot r_e^2 \cdot g (\rho_e - \rho_{AU})}{9 \cdot v_{AU}}$$

$$\eta_{AU} = \frac{2 \cdot (0,005 \text{ m})^2 (9,81 \text{ m/s}^2) (9549,296585 \text{ kg/m}^3 - 937,5 \text{ kg/m}^3)}{9 \cdot (0,039007092 \text{ m/s})}$$

$$\eta_{AU} = 12,03224567 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

$$\eta_{AU} = 12032,24567 \text{ cP}$$

Cálculo de la viscosidad cinemática del aceite nuevo y usado

Para proceder con el cálculo de la viscosidad cinemática es necesario el uso de la viscosidad dinámica y de la densidad de los fluidos analizados.

$$U_{AN} = \frac{\eta_{AN}}{\rho_{AN}}$$

$$U_{AN} = \frac{12,50158856 \text{ Pa} \cdot \text{s}}{937,5 \text{ kg/m}^3}$$

$$U_{AN} = 0,013335027 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$U_{AN} = 13335,0278 \text{ cSt}$$

$$U_{AU} = \frac{\eta_{AU}}{\rho_{AU}}$$

$$U_{AU} = \frac{12,03224567 \text{ Pa} \cdot \text{s}}{937,5 \text{ kg/m}^3}$$

$$U_{AU} = 0,012834395 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$U_{AU} = 12834,39538 \text{ cSt}$$

**Tabla 46.**  
**Resumen cálculos**  
**RESULTADOS**

<b>PARÁMETRO</b>	<b>ACEITE NUEVO</b>	<b>ACEITE USADO</b>
Masa	0,015 kg	0,015 kg
Tiempo	2,93 s	2,82 s
Velocidad	0,037542662 $m/s$	0,039007092 $m/s$
Densidad	937,5 $kg/m^3$	937,5 $kg/m^3$
Viscosidad dinámica	12501,58856 $cP$	12032,24567 $cP$
Viscosidad cinemática	13335,0278 $cSt$	12834,39538 $cSt$

## CAPÍTULO V

### 5. MARCO ADMINISTRATIVO

#### 5.1 Recursos

##### 5.1.1 Recursos humanos

En cuanto al recurso humano que intervino en la elaboración y desarrollo de la investigación, se enfatiza la valiosa contribución del personal especializado con el aporte de conocimiento en las diferentes etapas que se puntualizan a continuación:

Geovanny Altamirano León	Investigación, desarrollo y financista del proyecto.
Ing. Leónidas Quiroz	Tutor y asesor general.
Mayor Alexander Pazmiño	Comandante de la UMAT Cuerpo de Ingenieros del Ejército.
Ing. Cristian Celi	Asesoría en proceso de recolección de muestras de lubricante.
Ing. Polo Horna	Asesoría en pruebas y métodos de investigación.
Ing. Jorge Rosero	Asesoría en análisis de resultados de las muestras.
Ing. Andreí Copo	Asignación del vehículo del Cuerpo de Ingenieros del Ejército.
Cabo Luis Chicaiza	Supervisor del seguimiento de recolección de muestras.
Sr. Victor Rubio	Chofer y encargado del vehículo usado para la investigación.

### 5.1.2 Recursos tecnológicos

Los recursos tecnológicos son los medios que ayudaron con el desarrollo de la parte escrita de la investigación y tabulación de resultados obtenidos de las muestras analizadas.

Los materiales tecnológicos empleadas se detallan a continuación:

Titrador potenciométrico	Analizador del TBN (Número Total Base).
Viscosímetro CANNON	Analizador de la viscosidad cinemática a 100°C.
Infrarrojo por transformada de Fourier	Analizador de la condiciones del aceite (Nitración, sulfatación, oxidación y hollín).
Espectrómetro de emisión atómica	Analizador de los elementos de desgaste.
Microsoft Office (Word/Excel)	Elaboración escrito / Tabulación.

**Tabla 47.**

#### Costo de recursos tecnológicos

#### **RECURSOS TECNOLÓGICOS**

<b>Ord.</b>	<b>Descripción</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>	<b>Costo Unitario</b>	<b>Costo Total</b>
1	Microsoft Office	1	Unidad	\$ 50.00	\$ 50.00
2	Analizadores	7	Unidades	\$ 30.00	\$ 210.00
<b>Total</b>					<b>\$ 260.00</b>

### 5.1.3 Recursos materiales

Los recursos materiales son los elementos físicos que se emplean durante el desarrollo y culminación del trabajo de titulación, donde el gasto de combustible (diesel) y del aceite PDV grado SAE 15W40 usados por la volqueta fue asumido por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército y referente al

material empleado en el desarrollo de la investigación se detalla los siguientes elementos:

- Volqueta MACK GU813E
- Caja de Herramientas (llaves, dados, desarmadores, etc.)
- Multímetro digital
- Bomba manual de vacío
- Equipos de oficina (laptop, calculadora)
- Muestras de aceite nuevo y usado
- Manguera de ¼ de pulgada
- Envases de recolección con etiquetas

**Tabla 48.**

**Costo recurso material**

**RECURSOS MATERIALES**

<b>Ord.</b>	<b>Descripción</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>	<b>Costo Unitario</b>	<b>Costo Total</b>
1	Prueba aceite nuevo	1	Unidad	\$ 120.00	\$ 120.00
2	Pruebas aceite usado	6	Unidades	\$ 120.00	\$ 720.00
3	Equipo de protección personal	1	Unidad	\$ 20.00	\$ 20.00
4	Multímetro digital	1	Unidad	\$30.00	\$ 30.00
5	Bomba manual	1	Unidad	\$ 50.00	\$ 50.00
6	Caja de herramientas	1	Unidad	\$ 300.00	\$ 300.00
7	Combustible movilización	75	Galones	\$ 1.48	\$ 111.00
8	Calculadora	1	Unidad	\$20.00	\$20.00
9	Manguera ¼ pulg.	12	Metros	\$ 1.25	\$ 15.00
10	Resma de papel Bond A4	1	Unidad	\$ 5.75	\$ 5.75
11	Copias e	800	Unidades	\$ 0.05	\$ 40.00

CONTINÚA



impresiones					
<b>12</b>	Pasajes	21	Unidades	\$ 4.00	\$ 84.00
<b>13</b>	Estadía	1	Día	\$ 20.00	\$ 20.00
<b>14</b>	Alimentación	20	Unidades	\$ 3.00	\$ 60.00
<b>Total</b>					\$ 1595.75

## 5.2 Gastos del proyecto

Una vez determinado los costos de recursos tecnológicos y materiales para el desarrollo del proyecto de titulación se procede a calcular el costo total.

**Tabla 49.**  
**Costo total neto**

<b>Descripción</b>	<b>Costo</b>
<b>Recursos tecnológicos</b>	\$ 260.00
<b>Recursos materiales</b>	\$ 1595.75
<b>Total</b>	\$ 1855.75

Se adiciona que para la elaboración y ejecución del proyecto de investigación el costo total es de \$ 1855,75.

### 5.3 Cronograma

Nombre de la Tarea	Duración	Comienzo	Finalización	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril-Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero
1 Solicitud y aprobación del tema	25 días	jue 23/10/15	mié 02/12/15												
2	<b>CAPITULO I</b>														
Investigar sobre los antecedentes y plantear el problema. Describir el proyecto y justificar. Plantear los objetivos, metas, hipótesis y variables de la	35 días	lun 07/12/15	vién 22/01/16												
3	<b>CAPITULO II</b>														
4 Revisar el Estado de la Ciencia en lo referente a la degradación de aceites lubricantes para motor Diesel	40 días	lun 01/02/16	vién 25/03/16												
5	<b>CAPITULO III</b>														
6 Análisis del aceite lubricante y del vehículo utilizado.	130 días	lun 28/03/16	vién 23/09/16												
7	<b>CAPITULO IV</b>														
8 Análisis de resultados de las muestras de los aceites obtenidas de la volqueta Mack GU813E.	40 días	lun 03/10/16	vién 25/11/16												
9	<b>CAPITULO V</b>														
10 Marco administrativo	20 días	lun 28/11/16	vién 23/12/16												
11 Conclusiones y Recomendación	10 días	lun 09/01/17	vién 20/01/17												
12															

## CONCLUSIONES

- En función a los datos obtenidos de la viscosidad cinemática se determinó que el rendimiento en el motor de la volqueta MACK GU813E disminuirá a partir de las 370 horas de operación del motor.
- La viscosidad presentó un valor base de 14,5 cSt, dicha propiedad se degradó por efectos de procesos químicos, obteniendo un valor de 13,1 cSt a las 300 horas de operación y un valor de 12,5 cSt al cumplir los 2579 kilómetros de recorrido, representando los porcentajes de degradación de 9,66% para las horas de operación y de 13,79% de degradación para el kilometraje recorrido, estableciendo que la viscosidad cinemática resultante al cumplir el ciclo de vida útil en función al kilometraje no es apta para seguir en funcionamiento.
- Se realizó los análisis respectivos a cada muestra de aceite lubricante usado que fueron obtenidos en función a las horas de operación del motor (75, 130, 200 y 300) y del kilometraje recorrido por el vehículo (1500, 2200, 3000 y 5000), los cuales fueron guías para los análisis comparativos con los valores de línea base (LB) de cada prueba ejecutada.
- Se determinó el comportamiento y porcentaje de degradación que el TBN presenta de 10,5 a 9,5 mg KOH/gr obtenidos después de cumplir las 300 horas de operación del motor, representando un 9,52% de degradación del lubricante; se obtuvo un valor de 9 mg KOH/mg al haber culminado el lubricante su vida útil a los 5000 km de recorrido representando un 14,29% de degradación, dichos valores son aceptables debido a que los rangos críticos hasta los cuales el TBN puede llegar a degradarse son del 50% de la línea base (LB).

- Al analizar los valores obtenidos según el kilometraje recorrido de los elementos de desgaste se puede establecer que el elemento con mayor presencia fue el hierro (Fe), el cual incrementó su valor base de 2 a 14 ppm, el cobre (Cu) presentó un incremento moderado de 0 a 5 ppm; entre los elementos con menor presencia se encuentran el aluminio (Al), plomo (Pb), estaño (Sn) y cromo (Cr); en base a estos resultados obtenidos del Fe, Cu y Pb, las posibles fuentes de desgaste son los cojinetes de biela y bancada, camisas del cilindro y cigüeñal entre otros.
- Se analizó los valores de los elementos de desgaste en función a las horas de operación obteniendo que el elemento con mayor presencia es el hierro (Fe), con un incremento de 2 a 6 ppm al término de las 300 horas de operación, el cobre (Cu) con un aumento moderado de 0 a 3 ppm al término del análisis y el plomo (Pb) con un incremento leve de 0 a 1 ppm, encontrando estos resultados favorables para la vida útil de los componentes internos del motor.
- Al analizar los resultados de las condiciones del aceite lubricante en función de las horas de operación, se puede establecer que la oxidación (OXI) no presentó ninguna variación manteniendo un valor de 11 UFM a lo largo de las 300 horas de funcionamiento, la nitración (NIT) aumentó levemente de 3 a 4 UFM y la sulfatación (SUL) descendió de 20 a 18 UFM al término de la experimentación; demostrando que el aceite lubricante no presentó un deterioro a reacciones químicas asociadas al proceso de combustión en el motor.
- Considerando los valores de las condiciones del aceite en función del kilometraje recorrido por el vehículo se establece que la oxidación (OXI) no presentó ninguna variación desde su valor base hasta el término del recorrido el cual fue de 11 UFM, la nitración (NIT) incrementó su valor base de 3 a 4 UFM desde los 1500 kilómetros para mantenerse constante hasta el final del recorrido, la sulfatación

(SUL) disminuyó de 20 a 19 UFM al cumplir los 5000 kilómetros de recorrido, obteniendo que el lubricante mantiene los problemas de contaminación controlados.

- La presencia de elementos contaminantes como el silicio (Si), sodio (Na), potasio (K) y hollín (ST); presentaron un bajo perfil en cada muestra recolectada y analizada, descartando problemas de contaminación con tierra debido a que el Silicio se mantuvo estable en 3 ppm, ya sea en función del tiempo de operación y kilometraje recorrido, la presencia del sodio y potasio demostró un comportamiento similar debido a que no incremento sus valores base; el incremento del hollín a lo largo de la investigación fue moderado llegando a un valor máximo de 5 UFM en función del tiempo y a 11 UFM en el kilometraje recorrido, descartando problemas como acumulación de depósitos de carbón detrás de los anillos del pistón e incremento en la viscosidad del lubricante.

## RECOMENDACIONES

- Realizar el análisis de los aceites lubricantes de motor, considerando condiciones como el TAN (Número Total Ácido), el cual suele ser usado con mayor frecuencia en vehículos que usan gas licuado de petróleo (GLP) o gas natural comprimido (GNC); el uso en motores a diésel es limitado debido a que los aditivos detergentes-dispersantes pueden provocar medidas erróneas y por ende un diagnóstico equivocado.
- Realizar un seguimiento en torno al control, cuidado y al mantenimiento de las unidades que el Cuerpo de Ingenieros del Ejército posee, permitiendo con ello conocer el estado y grado de deterioro que los vehículos sufren conforme el tiempo transcurre.
- Desarrollar proyectos investigativos que involucren la participación de otras carreras, motivando al estudio de temas como lo es el estudio de la cantidad de masa que la muestra de aceite puede contener de cada elemento químico que constituyen las piezas móviles de un motor de combustión, un sistema de engranajes o cualquier sistema que requiera de lubricación.
- Es necesario realizar el análisis del aceite nuevo considerado Línea Base, ya que ello permitirá realizar un estudio de la degradación que el lubricante presentará a lo largo de su vida útil, por ello es vital recolectar la muestra del mismo depósito o bidón del cual se va a usar para el cambio de aceite.
- El proceso de recolección de las muestras de aceite usado debe ser mediante el uso de la técnica de vampiro, ya que dicho método permite obtener muestras libres de impurezas, con mayor facilidad y por ende minimizando la distorsión de la información de los resultados.
- Es imprescindible especificar y detallar todos los parámetros

necesarios en el proceso de etiquetado, con ello evitar problemas por falta de información como suele ocurrir por la inexistencia de la marca del vehículo, horas de operación o kilometraje recorrido, tipo, marca, grado y clasificación del aceite.

- El vehículo debe encontrarse en perfectas condiciones de funcionamiento, para ello se deben efectuar los mantenimientos pertinentes, con el fin de evitar paros innecesarios del automotor, garantizando así la seguridad del conductor y la obtención de medidas más exactas.
- El uso de equipo de protección personal debe ser un parámetro primordial desde la recolección de las muestras hasta la realización de cada una de las pruebas con ello eliminar posibles accidentes o complicaciones en el desarrollo del proyecto.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

### TEXTOS

Bhushan, B. (2013). *Introduction to Tribology* (Vol. Two). Ohio, USA: WILEY.

Cengel, Y., & Boles, M. (2008). *Termodinámica* (Sexta ed.). México: McGraw Hill.

Dusenbery, D. (2009). *Living at micro scale*. Massachusetts: MASS.

Jean, B., Jacques, D., & Parc, G. (1989). *Rheological Properties of Lubricants*. Paris: Technip.

Kato, Koji & Adachi. (2001). *Modern Tribology Handbook: Abrasive wear* (Vol. Two). Ohio: Chief.

Kudish, I., & Covitch, M. (2010). *Modeling and Analytical Methods in Tribology*. Ohio: CRC Press.

Martínez, B. T. (2005). *Diagnóstico de motores diesel mediante el análisis del aceite usado*. España: REVERTÉ.

Mott, R. (2006). *Mecánica de fluidos* (Sexta ed.). México: PEARSON.

Schouwenaars Franssens, R. (2004). *Análisis de la deformación plástica durante el desgaste de cojinetes de deslizamiento*. México.

Shizhu, W., & Ping, H. (2012). *Principles of Tribology: Basic Theories of Hydrodynamic Lubrication*. Tsinghua, China: John Wiley and Sons.

Takadoum, J. (2007). *Materials and Surface Engineering in Tribology*.  
Francia: WILEY.

Tylczak, J. (2004). *ASTM Metals Handbook* (Vol. 18).

## ARTÍCULOS Y NORMATIVAS

2030. (2011). Productos derivados del Petróleo. Aceites lubricantes para motores de combustión interna de ciclo Diesel . *Instituto Ecuatoriano de Normalización*, 1-8.

D-445. (1965). Viscosidad de líquidos transparentes y opacos (Viscosidad cinemática y dinámica). *ASTM International*, 3-8.

D-5185. (2009). Determination of Additive Elements, Wear Metals, and Contaminants in Used Lubricating Oils and Determination of Selected Elements in Base Oils by Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometry (ICP-AES). *ASTM International*, 1-5.

D-974. (2004). Acid and Base Number by Color-Indicator Titration. *ASTM International*, 1-7.

E-2412. (2010). Monitoreo de la condición de los lubricantes en servicio mediante análisis de tendencias por espectrometría infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) . *ASTM International*, 1-24.

ISO/IEC17025. (2005). Requisitos generales para la competencia de laboratorios de ensayo y calibración. *International Organization for Standardization*, 1-10.

ISO14001. (2004). Sistemas de Gestión Ambiental. *ISO Norma Internacional*, 1-25.

ISO4406. (1999). Hydraulic fluid power — Fluids — Method for coding the level of contamination by solid particles. *International Standard*, 1-12.

ISO9001. (2008). Sistemas de gestión de la calidad. *ISO Norma*

*Internacional*, 1-40.

J300. (2013). Viscosity Grades for Engine Oils. *SAE International*, 1.

OHSAS18001. (2007). Sistemas de Gestión de Seguridad y Salud Ocupacional (Requisitos). *Occupational Health and Safety Assessment Series*, 1-35.

## NETGRAFÍA

Albarracin, P. (23 de Enero de 2013). *SlideShare. Recuperado (10 de Agosto de 2016)*. Obtenido de <http://es.slideshare.net/jstrespalacios/5-aditivos-para-los-lubricantes>

Arguello, J. (2010). *Análisis de aceite lubricantes. Recuperado (12 de Julio de 2016)*. Obtenido de [https://www.academia.edu/5187356/AN%C3%81LISIS\\_DE\\_ACEITES\\_LUBRICANTES](https://www.academia.edu/5187356/AN%C3%81LISIS_DE_ACEITES_LUBRICANTES)

CAL. (2012). *Clasificación de los Lubricantes. Recuperado (21 de Julio de 2016)*. Obtenido de Cámara Argentina de Lubricantes: [www.sistemamid.com/download.php?a=94291](http://www.sistemamid.com/download.php?a=94291)

Calu. (2015). *Almacenamiento y manipulacion de lubricantes. Recuperado (16 de Septiembre de 2016)*. Obtenido de <http://www.calu.com.uy/Almacenamiento.pdf>

CEMPRE. (2014). *CEMPRE URUGUAY. Recuperado (9 de Noviembre de 2016)*. Obtenido de [http://www.cempre.org.uy/index.php?option=com\\_content&view=article&id=79&Itemid=97](http://www.cempre.org.uy/index.php?option=com_content&view=article&id=79&Itemid=97)

Cipriano, A. (15 de Septiembre de 2009). *Clasificación SAE. Recuperado (15 de Agosto de 2016)*. Obtenido de <http://es.slideshare.net/xipri/clasificacin-sae>

EcuRed. (24 de Julio de 2016). *EcuRed. Recuperado (15 de Noviembre de 2016)*. Obtenido de [http://www.ecured.cu/Desgaste\\_adhesivo](http://www.ecured.cu/Desgaste_adhesivo)

estrucplan. (01 de Enero de 2000). *Tratamiento Aceites Usados. Recuperado (22 de Diciembre de 2016)*. Obtenido de <http://www.estrucplan.com.ar/Producciones/entrega.asp?IDEntrega=1856>

GONHER. (20 de Febrero de 2016). *Lubricantes API. Recuperado (25 de Junio de 2016)*. Obtenido de <http://www.grupogonher.com/pagina/certificacionapi>

González, R. (11 de Octubre de 2012). *Lubricación y lubricantes. Recuperado (28 de Julio de 2016)*. Obtenido de <http://www.monografias.com/trabajos94/lubricacion-y-lubricantes/lubricacion-y-lubricantes.shtml>

Gulf. (2015). *Manual Técnico Gulf. Recuperado (19 de Septiembre de 2016)*. Obtenido de [https://eva.fing.edu.uy/pluginfile.php/27557/mod\\_resource/content/0/Teorico/ManualTecnico\\_Gulf.pdf](https://eva.fing.edu.uy/pluginfile.php/27557/mod_resource/content/0/Teorico/ManualTecnico_Gulf.pdf)

IngesAerospace. (5 de Junio de 2011). *TRIBOLOGÍA: Lubricación Elastohidrodinámica. Recuperado (23 de Agosto de 2016)*. Obtenido de <http://inges aerospace-mechanicalengineering.blogspot.com/2011/06/tribologia-lubricacion.html>

JENSEN, C. (27 de Marzo de 2015). *Clean Oil - Bright Ideas. Recuperado (10 de Enero de 2017)*. Obtenido de [http://www.cjc.dk/fileadmin/user\\_upload/pdf/CJC\\_Brochures/CJC\\_Brochures\\_ES/DegradacionDelAceite\\_Barnices\\_ES.pdf](http://www.cjc.dk/fileadmin/user_upload/pdf/CJC_Brochures/CJC_Brochures_ES/DegradacionDelAceite_Barnices_ES.pdf)

Kullagerfabriken, S. (2016). *SKF. Recuperado (12 de Enero de 2017)*. Obtenido de [Almacenamiento del Lubricante: http://www.skf.com/ar/products/bearings-units-housings/super-precision-bearings/principles/lubrication/lubricant-storage/index.html](http://www.skf.com/ar/products/bearings-units-housings/super-precision-bearings/principles/lubrication/lubricant-storage/index.html)

Lublearn. (06 de Agosto de 2014). *La oxidación enemiga del lubricante. Recuperado (26 de Noviembre de 2016)*. Obtenido de <http://noria.mx/lublearn/la-oxidacion-enemiga-del-lubricante/>

Lublearn. (04 de Septiembre de 2016). *Noria. Recuperado (13 de Septiembre de 2016)*. Obtenido de <http://noria.mx/lublearn/causas-de-cambio-del-numero-basico-de-un-aceite/>

Lubtek. (15 de Junio de 2016). *Lubricantes sintéticos. Recuperado (29 de Julio de 2016)*. Obtenido de [http://www.lubtek.cl/index2.php?option=com\\_content&do\\_pdf=1&id=16](http://www.lubtek.cl/index2.php?option=com_content&do_pdf=1&id=16)

Matters. (2012). *Engine Oil Guide. Recuperado (21 de Noviembre de 2016)*. Obtenido de Motor Oil: [http://www.api.org/~media/files/certification/engine-oil-diesel/publications/spanish\\_engine\\_oil\\_guide\\_3q2012\\_es1.pdf](http://www.api.org/~media/files/certification/engine-oil-diesel/publications/spanish_engine_oil_guide_3q2012_es1.pdf)

Nebrija. (2014). *Lubricación. Recuperado (10 de Agosto de 2016)*. Obtenido de <http://www.nebrija.es/~alopezro/Lubricacion.pdf>

Noria. (Septiembre de 2001). ISO Viscosity Grades. *Machinery Lubrication. Recuperado (16 de Enero de 2017)*. Obtenido de [http://www.swissoil.com.ec/boletines/SO\\_Boletin05\\_viscosidad%20ISO.pdf](http://www.swissoil.com.ec/boletines/SO_Boletin05_viscosidad%20ISO.pdf)

Noria. (06 de Agosto de 2014). *Monitoreo de la degradación del lubricante con espectrometría infrarroja. Recuperado (27 de Junio de 2016)*. Obtenido de <http://noria.mx/lublearn/monitoreo-de-la-degradacion-del-lubricante-con-espectrometria-infrarroja/>

Ortega, I. (2014). *Caracterización Tribológica de fundiciones CuMgSn mediante tribometría coaxial. Recuperado (3 de Mayo de 2016)*. Obtenido de [http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/4039/Tesis\\_Ivan\\_Ortega\\_Peraya\\_10.0.pdf?sequence=1](http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/4039/Tesis_Ivan_Ortega_Peraya_10.0.pdf?sequence=1)

Paez, F. (21 de Noviembre de 2013). *Entendiendo los grados de viscosidad SAE para lubricantes de motor*. Recuperado (10 de Septiembre de 2016). Obtenido de Noria: <http://noria.mx/lublearn/entendiendo-los-grados-de-viscosidad-sae-para-lubricantes-de-motor/>

Peréz, J. (2012). *Clasificación de aceites lubricantes*. Recuperado (26 de Octubre de 2016). Obtenido de [https://www.google.com.ec/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=6&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwjKu6KDK5XOAhWGdx4KHbkfB-MQFggpMAU&url=http%3A%2F%2Fwww.educarm.es%2Ftemplates%2Fportal%2Fficheros%2FwebsDinamicas%2F21%2Fclasifica\\_acea.doc&usg=AFQjCNEWk6uaGkgdcp](https://www.google.com.ec/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=6&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwjKu6KDK5XOAhWGdx4KHbkfB-MQFggpMAU&url=http%3A%2F%2Fwww.educarm.es%2Ftemplates%2Fportal%2Fficheros%2FwebsDinamicas%2F21%2Fclasifica_acea.doc&usg=AFQjCNEWk6uaGkgdcp)

Petrocomercial. (2016). *Lubricantes Petrocomercial*. Recuperado (15 de Octubre de 2016). Obtenido de Lubricantes Petrocomercial: <http://lubricantespetrocomercial.com/motores/motores-a-diesel-turbo-diesel-15w40-ci-4-sl.php>

PublicacionesDidácticas. (6 de Agosto de 2015). *Clasificación ACEA para aceites de Motor*. Recuperado (14 de Diciembre de 2016). Obtenido de <http://www.seindor.com/publicacionesdidacticas.com/hemeroteca/articulo/061016/articulo-pdf>

Uribe, C. (2014). *IMPORTANCIA Y OBJETIVOS DE LA GESTIÓN DE ALMACENES*. Recuperado (19 de Diciembre de 2016). Obtenido de [http://www.academia.edu/9912154/IMPORTANCIA\\_Y\\_OBJETIVOS\\_DE\\_LA\\_GESTI%C3%93N\\_DE\\_ALMACENES](http://www.academia.edu/9912154/IMPORTANCIA_Y_OBJETIVOS_DE_LA_GESTI%C3%93N_DE_ALMACENES)

Viteri, L., & Jaramillo, J. (11 de Marzo de 2011). *Análisis de la degradación de aceites lubricantes y propuesta de planes de mejora para el mantenimiento del equipo pesado del ilustre municipio del Cantón Archidona*. Recuperado (10 de Julio de 2016). Obtenido de <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/947/1/65T00018.pdf>

WIDMAN. (Junio de 2016). *WIDMAN INTERNATIONAL SRL*. Recuperado (1 de Febrero de 2017). Obtenido de <http://www.widman.biz/Seleccion/viscosidad.html>

Wright, J. (22 de Marzo de 2016). *Es el análisis del lubricante una pérdida de tiempo*. Recuperado (1 de Febrero de 2017). Obtenido de <http://noria.mx/lublearn/es-el-analisis-del-lubricante-una-perdida-de-tiempo/>

# ANEXOS



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y  
MECÁNICA  
CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**

**CERTIFICACIÓN**

Se certifica que el presente trabajo fue desarrollado por el señor:  
**GEOVANNY ALEXANDER ALTAMIRANO LEÓN**

En la ciudad de Latacunga, a los **veinte y dos días del mes de Febrero del 2017.**

**Aprobado por:**

Ing. Leonidas Quiroz  
**DIRECTOR DEL PROYECTO**

Ing. Danilo Zambrano  
**DIRECTOR DE CARRERA**

Dr. Juan Carlos Díaz  
**SECRETARIO ACADÉMICO**