



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE CUENCA

CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

**CARACTERIZACIÓN FISCOQUÍMICA DE ACEITES HIDRÁULICOS EN EMAC EP
PARA LA FORMULACIÓN DE UNA LÍNEA BASE TÉCNICA**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
título de Ingeniero Automotriz

AUTORES: JONATHAN SAUL ORDOÑEZ POMA

PABLO JOSUÉ LÓPEZ YUNGA

TUTOR: ING. MILTON OSWALDO GARCÍA TOBAR, M.Sc.

Cuenca - Ecuador

2026

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Jonathan Saúl Ordoñez Poma con documento de identificación N° 1104215833 y Pablo Josué López Yunga con documento de identificación N° 0106130917; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Cuenca, 03 de febrero del 2026

Atentamente,



Jonathan Saul Ordoñez Poma

1104215833



Pablo Josué López Yunga

0106130917

CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

Nosotros, Jonathan Saúl Ordóñez Poma con documento de identificación N° 1104215833 y Pablo Josué López Yunga con documento de identificación N° 0106130917, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Proyecto técnico: “Caracterización fisicoquímica de aceites hidráulicos en EMAC EP para la formulación de una línea base técnica”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Automotriz, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 03 de febrero del 2026

Atentamente,



Jonathan Saul Ordoñez Poma

1104215833



Pablo Josué López Yunga

0106130917

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Milton Oswaldo García Tobar con documento de identificación N° 0104282181, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: CARACTERIZACIÓN FISICOQUÍMICA DE ACEITES HIDRÁULICOS EN EMAC EP PARA LA FORMULACIÓN DE UNA LÍNEA BASE TÉCNICA, realizado por Jonathan Saúl Ordoñez Poma con documento de identificación N° 1104215833 y por Pablo Josué López Yunga con documento de identificación N° 016130917, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 03 de febrero del 2026

Atentamente,

A handwritten signature in blue ink, consisting of a stylized 'M' and 'G' followed by a horizontal line.

Ing. Milton Oswaldo García Tobar, M.Sc.

0104282181

DEDICATORIA

Dedico el presente trabajo de titulación, con profundo respeto, cariño y gratitud, a mis padres, Manuel Ordoñez y Rosa Poma, quienes han sido el pilar fundamental de mi formación personal, académica y profesional. A ellos les agradezco sinceramente por su apoyo incondicional, por los valores inculcados desde el hogar y por la confianza depositada en mí a lo largo de cada etapa de este proceso.

Su esfuerzo constante, su sacrificio silencioso y sus palabras de aliento fueron la motivación necesaria para perseverar ante las dificultades y superar los desafíos que se presentaron durante este camino académico. Gracias a su ejemplo de responsabilidad, constancia y compromiso, hoy puedo culminar una etapa importante de mi vida con orgullo y satisfacción.

De manera muy especial, dedico este trabajo a mi querido hijo, Elian Misael, quien se ha convertido en mi mayor fuente de inspiración y fortaleza. Su presencia en mi vida le dio un nuevo sentido a cada

esfuerzo realizado y fue el motor que me impulsó a seguir adelante con mayor responsabilidad, amor y compromiso, incluso en los momentos más difíciles.

Asimismo, expreso mi agradecimiento a mis hermanas, quienes con su apoyo, compañía y comprensión han sido una fuente permanente de ánimo y fortaleza emocional. Su presencia, consejos y respaldo incondicional contribuyeron significativamente a mantener la motivación y el equilibrio necesarios para alcanzar este objetivo académico.

Este logro no representa únicamente un objetivo personal alcanzado, sino también el reflejo del acompañamiento, la entrega y el amor de mi familia. Les entrego este trabajo como muestra de mi eterna gratitud y como expresión de mi compromiso permanente de honrar su esfuerzo y dedicación.

Finalmente, extendiendo esta dedicatoria a todas aquellas personas que, de una u otra manera, contribuyeron a mi desarrollo personal y profesional durante este proceso, brindándome apoyo, orientación y palabras de ánimo que fueron

fundamentales para alcanzar este objetivo académico.

Jonathan Saul Ordoñez Poma

DEDICATORIA

Dedico el presente trabajo de titulación, con profundo amor, respeto y gratitud, a mis padres, Edgar Rosendo López y Rosario Beatriz Yunga, quienes han sido el pilar fundamental de mi vida y de mi formación personal, académica y profesional. A ellos les agradezco infinitamente por su apoyo incondicional, por los valores sembrados desde el hogar y por creer en mí a pesar de mis momentos de debilidad.

Su esfuerzo diario, su sacrificio silencioso y sus palabras de aliento fueron la fuerza que me impulsó a seguir adelante cuando el camino parecía difícil. Gracias a su ejemplo de responsabilidad, constancia y compromiso, hoy puedo culminar una etapa muy importante de mi vida con orgullo, satisfacción y la certeza de que todo esfuerzo vale la pena.

De manera especial, dedico este trabajo a mis hermanos y hermanas, quienes con su compañía, comprensión y apoyo incondicional fueron una fuente constante de ánimo y fortaleza emocional. Su presencia y respaldo fueron esenciales para

mantener la motivación y el equilibrio necesarios durante este camino académico.

Asimismo, dedico este logro a mi enamorada Ángeles por su paciencia, comprensión y apoyo constante durante este proceso. Por sus palabras de aliento, su acompañamiento y su confianza en mí fueron fundamentales para superar los momentos de mayor exigencia y cansancio, convirtiéndose en un apoyo invaluable durante este proceso.

Finalmente, extiendo esta dedicatoria a mi compañero y amigo de titulación, con quien compartí aprendizajes, esfuerzos y experiencias a lo largo de este camino, contribuyendo de manera significativa al desarrollo y culminación del presente trabajo.

Este logro no representa únicamente un objetivo personal alcanzado, sino el reflejo del amor, el apoyo y la entrega de todas las personas que caminaron conmigo durante este proceso. A todos ustedes, mi eterna gratitud.

Pablo Josué López Yunga

AGRADECIMIENTO

Al concluir una de las etapas más significativas de mi formación universitaria, expreso mi sincero agradecimiento a todas las personas que hicieron posible el desarrollo y la finalización del presente trabajo de titulación. La consecución de este objetivo académico fue posible gracias al acompañamiento, la orientación y el apoyo recibidos a lo largo de mi proceso formativo.

En primer lugar, agradezco a Dios por brindarme la fortaleza, la salud y la claridad necesarias para avanzar de manera constante durante cada fase de esta investigación. Su guía fue fundamental para mantener la constancia, la serenidad y la confianza requeridas para superar los retos presentados.

De manera especial, manifiesto mi reconocimiento al Ing. Milton Oswaldo García Tobar, M.Sc., por su asesoría académica, su permanente disposición y el valioso aporte de conocimientos técnicos durante el desarrollo de este trabajo. Sus observaciones, criterios profesionales y acompañamiento contribuyeron de forma decisiva al rigor

metodológico y al fortalecimiento técnico de la investigación.

Asimismo, extendo mi agradecimiento a los docentes de la carrera, quienes, a través de su experiencia, compromiso y vocación académica, aportaron significativamente a mi formación universitaria y al desarrollo de competencias profesionales fundamentales para mi desempeño.

De igual manera, expreso mi gratitud a mis padres y familiares por el apoyo brindado durante esta etapa, tanto en el ámbito emocional como en el organizativo. Su comprensión, respaldo constante y motivación permanente fueron esenciales para afrontar las exigencias del proceso académico y alcanzar este objetivo.

Finalmente, agradezco a todas aquellas personas que, directa o indirectamente, contribuyeron a la realización de este trabajo mediante su orientación, apoyo o acompañamiento, haciendo de este proceso una experiencia formativa valiosa y enriquecedora.

Jonathan Saul Ordoñez Poma

AGRADECIMIENTO

Al concluir una etapa importante de mi formación profesional, manifiesto mi más sincero agradecimiento a todas las personas que hicieron posible el desarrollo y la culminación del presente trabajo de titulación. Siendo posible este logro gracias al apoyo, la orientación y el acompañamiento recibidos a lo largo de este proceso académico y personal.

En primer lugar, agradezco a Dios, por brindarme discernimiento, sabiduría, salud y fortaleza para afrontar cada etapa de este camino, permitiéndome perseverar con fe, constancia y confianza hasta alcanzar este objetivo.

Expreso un agradecimiento especial al Ing. Milton Oswaldo García Tobar, M.Sc., por su valiosa orientación académica, su disposición permanente y los conocimientos compartidos durante el desarrollo de esta investigación. Su acompañamiento, criterios técnicos y profesionalismo fueron fundamentales para el fortalecimiento metodológico y técnico del presente trabajo de titulación.

Asimismo, agradezco a los docentes de la carrera, quienes a lo largo de mi formación universitaria contribuyeron significativamente a mi desarrollo académico y profesional mediante la transmisión de sus conocimientos, experiencia y vocación educativa.

De manera especial, agradezco a mis padres, Edgar López y Rosario Yunga, por su apoyo incondicional, comprensión y motivación constante. Su respaldo emocional y su confianza fueron pilares fundamentales para superar los desafíos presentados durante este proceso.

A mis hermanos y hermanas, les agradezco por su compañía, apoyo y palabras de ánimo, que fueron un impulso constante para continuar adelante. De igual manera, agradezco a mi enamorada Ángeles, por su paciencia, comprensión y apoyo incondicional, convirtiéndose en un soporte fundamental durante los momentos de mayor exigencia académica.

Finalmente, expreso mi agradecimiento a mi compañero y amigo de titulación y a todas las personas que aportaron a la culminación de este trabajo de titulación, convirtiendo este proceso en

*una experiencia formativa de alto valor tanto en el
ámbito académico como personal.*

Pablo Josué López Yunga

RESUMEN

La gestión adecuada de los aceites hidráulicos es un factor clave para garantizar la confiabilidad, la eficiencia operativa y la vida útil de los sistemas hidráulicos en flotas de maquinaria pesada. En la Empresa Pública Municipal de Aseo de Cuenca (EMAC-EP), el control del estado de los aceites se ha basado principalmente en especificaciones del fabricante, sin considerar de forma sistemática los efectos del almacenamiento, la manipulación y las condiciones ambientales, lo que limita la toma de decisiones técnicas fundamentadas. En este contexto, el objetivo del estudio fue evaluar la condición fisicoquímica de aceites hidráulicos ISO VG 68 almacenados en la EMAC-EP, con el fin de establecer una línea base técnica confiable previa a su uso operativo.

La metodología corresponde a un enfoque cuantitativo, descriptivo y comparativo, sustentado en ensayos de laboratorio normalizados. Se aplicó un protocolo de muestreo controlado con trazabilidad adecuada. Los aceites fueron analizados mediante espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), titulación coulométrica de Karl Fischer para el contenido de agua y conteo de partículas sólidas conforme a la norma ISO 4406. Los resultados se compararon con las especificaciones del fabricante y con los criterios técnicos de la literatura especializada vigente.

Los resultados evidenciaron que el aceite nuevo sellado presenta bajos niveles de oxidación, nitración, sulfatación y acidez, así como un contenido de agua prácticamente nulo y un alto grado de limpieza, lo que permitió definirlo como referencia para la línea base del sistema. Las muestras provenientes de tanque y manguera mostraron incrementos en los parámetros fisicoquímicos y la contaminación por partículas sólidas; sin embargo, estos valores se mantuvieron dentro de rangos operativos aceptables, sin evidenciar degradación crítica.

El principal aporte del estudio radica en la formulación de una línea base técnica integral para aceites hidráulicos en almacenamiento, que constituye una herramienta objetiva para el diagnóstico temprano, la gestión del mantenimiento preventivo y la optimización de la confiabilidad operativa de los sistemas hidráulicos de la flota EMAC-EP en contextos operativos municipales locales.

Palabras clave: Aceites hidráulicos; Línea base técnica; Espectroscopía FTIR; Contenido de agua; Conteo de partículas

ABSTRACT

Proper management of hydraulic oils is a key factor in ensuring the reliability, operational efficiency, and service life of hydraulic systems in heavy machinery fleets. At the Municipal Public Cleansing Company of Cuenca (EMAC-EP), hydraulic oil condition control has traditionally relied on manufacturer specifications, without systematically considering the effects of storage, handling, and environmental conditions. This limitation restricts technically sound decision-making regarding oil use, reuse, or disposal. In this context, the objective of this study was to evaluate the physicochemical condition of ISO VG 68 hydraulic oils stored at EMAC-EP in order to establish a reliable technical baseline prior to their operational use.

The methodology followed a quantitative, descriptive, and comparative approach, supported by standardized laboratory tests. A controlled sampling protocol with appropriate traceability was applied. Oil samples were analyzed using Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) to assess chemical degradation, coulometric Karl Fischer titration to determine water content, and solid particle counting in accordance with ISO 4406. The results were compared with manufacturer specifications and technical criteria reported in the relevant scientific literature.

The results showed that new, sealed oil exhibited low levels of oxidation, nitration, sulfonation, and acidity, as well as negligible water content and a high level of cleanliness, allowing it to be defined as the reference for the system baseline. Samples collected from storage tanks and hoses presented progressive increases in physicochemical parameters, water content, and particulate contamination. However, these values remained within acceptable operational limits and did not indicate critical oil degradation. Additionally, the analysis of oils with controlled water contamination demonstrated the sensitivity of FTIR spectroscopy for indirectly detecting moisture-related degradation effects.

The main contribution of this study lies in the development of an integrated technical baseline for stored hydraulic oils, providing an objective tool for early condition assessment,

preventive maintenance management, and optimization of the operational reliability of hydraulic systems within the EMAC-EP municipal fleet.

Keywords: Hydraulic oils; Technical baseline; FTIR spectroscopy; Water content; Particle counting

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	15
ABSTRACT.....	16
INDICE DE FIGURAS.....	21
INDICE DE TABLAS	22
1. INTRODUCCIÓN	25
2. PROBLEMA DE ESTUDIO	26
2.1 Antecedentes.....	26
2.2 Importancia y alcances.....	26
2.3 Delimitación.....	27
3. OBJETIVOS	28
3.1 Objetivo General.....	28
3.2 Objetivos específicos	28
4. CAPITULO I: IDENTIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS HIDRÁULICOS Y TIPOS DE ACEITE UTILIZADOS EN LA FLOTA DE LA EMAC-EP.....	29
4.1 Clasificación sistemas hidráulicos presentes	30
4.1.1 Sistema de compactación trasera (Rear-Load Compactor).....	30
4.1.2 Sistema hidráulico de carga y descarga de contenedores	32
4.1.3 Sistemas hidráulicos auxiliares	33
4.2 Caracterización operativa de la flota vehicular de la EMAC-EP	35
4.3 Modelos de vehículos y sistemas hidráulicos identificados en la flota EMAC-EP	35
4.3.1 Características técnicas de los sistemas hidráulicos	37
5. CAPÍTULO II: CARACTERIZACIÓN FISCOQUÍMICA DE ACEITES HIDRÁULICOS ALMACENADOS MEDIANTE ENSAYOS NORMADOS (ASTM/ISO) PARA EVALUAR SU CONDICIÓN ANTES DEL USO.	40
5.1 Diseño metodológico del estudio.....	40

5.2 Identificación, clasificación y documentación técnica de los aceites hidráulicos almacenados	41
5.2.1 Identificación del aceite a partir de la etiqueta	41
5.2.3 Documentación técnica del fabricante (TDS y SDS)	43
5.3 Protocolo de muestreo de aceites hidráulicos almacenados	44
5.3.4.1 Codificación de las muestras	46
5.5 Procedimiento de análisis de laboratorio	48
5.5.1 Equipos utilizados	49
5.7 Criterios de evaluación y valores de referencia para aceites hidráulicos ISO VG 68	55
6. CAPITULO III: ANALIZAR EL NIVEL DE CONTAMINACIÓN POR PARTÍCULAS SÓLIDAS Y CONTENIDO DE AGUA EN LOS ACEITES HIDRÁULICOS, UTILIZANDO TÉCNICAS ESTABLECIDAS EN NORMAS ISO 4406, ASTM D630 Y ASTM D664, CON EL PROPÓSITO DE DETECTAR POSIBLES DETERIOROS O RIESGOS DE APLICACIÓN. .	56
6.1 Contaminación por partículas sólidas en aceites hidráulicos (ISO 4406).....	56
6.1.1 Relevancia de la contaminación por partículas sólidas en la condición del aceite hidráulico	56
6.1.2 Principio del conteo de partículas según ISO 4406	57
6.1.3 Criterios Normativos y Límites de Contaminación por Partículas	58
6.1.4 Análisis de muestras	59
6.2 Determinación del contenido de agua en aceites hidráulicos mediante el método Karl Fischer.....	61
6.2.1 Resultados del análisis de contenido de agua por Karl Fischer	63
7. CAPITULO IV: ESTABLECER PARÁMETROS DE REFERENCIA TÉCNICOS A PARTIR DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS, MEDIANTE COMPARACIÓN CON ESPECIFICACIONES DEL FABRICANTE Y LITERATURA ESPECIALIZADA, PARA CONSTRUIR UNA LÍNEA BASE DE EVALUACIÓN DE ACEITES HIDRÁULICOS EN ALMACENAMIENTO.	68

7.1 Resultados analizados	69
7.1.1 Tipos de muestras analizadas.....	69
7.2. Resultados	71
7.2.1 Aceite nuevo sellado	71
7.2.1.1 Resultados del Análisis de FTIR para aceite nuevo sellado línea base	71
7.2.1.2 Resultados del Análisis de conteo de partículas para aceite nuevo sellado	74
7.2.1.3 Resultados del Análisis de Karl Fisher para aceite nuevo sellado.....	77
7.3 Definición de la línea base del aceite hidráulico mediante análisis FTIR, Karl Fischer y conteo de partículas.....	80
7.3.1 Línea base FTIR del aceite hidráulico	81
7.3.2 Línea base de limpieza del aceite – Conteo de partículas.....	81
7.3.3 Línea base de contenido de agua – Método Karl Fischer	82
7.3.4 Definición de la línea base del sistema hidráulico.....	83
7.4 Análisis comparativo posterior al establecimiento de la línea base.....	83
7.4.1 Análisis del aceite hidráulico usado en operación	83
7.5 Análisis del impacto de la contaminación por agua en el comportamiento fisicoquímico del aceite hidráulico ISO 68 bajo condiciones controladas	86
7.5.1 Resultado de Análisis de aceite con porcentaje de agua.....	86
8. CONCLUSIONES	91
9. RECOMENDACIONES.....	93
10. BIBLIOGRAFÍAS	94

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Ubicación de la UPS.....	27
Figura 2 Camión recolector con sistema de compactación trasera.	31
Figura 3 Unidad de recolección de residuos sólidos con sistema de elevación y descarga de carga.	33
Figura 4 Sistemas hidráulicos auxiliares.....	34
Figura 5 Etiqueta AW ISO 68	42
Figura 6 Bomba de muestreo utilizada para el muestreo de aceites hidráulicos almacenados..	45
Figura 7 Ejemplos de espectros FTIR correspondientes a un aceite hidráulico nuevo y a un aceite usado.....	49
Figura 8 Analizador FTIR Eraspec Oil.	51
Figura 9 Sistema de titulación automática Metrohm.....	52
Figura 10 Equipo de titulación coulométrica Karl Fischer.....	53
Figura 11 Contador portátil de partículas (YJS-150).....	54
Figura 12 Ejemplo de interpretación del código ISO 4406.....	58
Figura 13 Representación gráfica del conteo de partículas sólidas en aceites hidráulicos conforme a la norma ISO 4406.....	60
Figura 14 Curvas H ₂ O vs tiempo obtenidas mediante el método Karl Fischer para el aceite nuevo sellado.....	64
Figura 15 Curva H ₂ O vs tiempo obtenida mediante el método Karl Fischer para el aceite de manguera.....	66
Figura 16 Curva H ₂ O vs tiempo obtenida mediante el método Karl Fischer para el aceite de tanque.....	66
Figura 17 Análisis comparativo de los aceites nuevos ISO 68 mediante FTIR.....	73
Figura 18 Análisis comparativo del conteo de partículas del aceite ISO 68 en aceites nuevos..	76
Figura 19 Análisis comparativo de los aceites ISO 68.....	79
Figura 20 Análisis comparativo de aceites ISO 68 usados.....	85
Figura 21 Análisis comparativo del aceite ISO 68 mediante FTIR con porcentaje de agua controlado.....	88

INDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1</i>	<i>Inventario de vehículos de la flota EMAC-EP incluidos en el estudio.</i>	36
<i>Tabla 2</i>	<i>Parámetros operativos de los componentes del sistema hidráulico.</i>	38
<i>Tabla 3</i>	<i>Especificaciones Técnicas del Lubricante Valvoline AW Hydraulic Oil 68.</i>	38
<i>Tabla 4</i>	<i>Parámetros evaluados, normas aplicadas y técnicas de análisis empleadas en el estudio.</i>	40
<i>Tabla 5</i>	<i>Identificación y trazabilidad de los aceites hidráulicos almacenados.</i>	42
<i>Tabla 6</i>	<i>Propiedades fisicoquímicas nominales del aceite Valvoline AW Hydraulic Oil ISO VG 68.</i>	44
<i>Tabla 7</i>	<i>Estructura de la codificación de las muestras de aceite hidráulico.</i>	46
<i>Tabla 8</i>	<i>Ejemplos de codificación de muestras analizadas.</i>	47
<i>Tabla 9</i>	<i>Límites de referencia y rangos de contaminación por 1 ml, según el código ISO 4406:19/17/14, para sistemas de sensibilidad importante.</i>	59
<i>Tabla 10</i>	<i>Resultados del conteo de partículas en las muestras de aceite hidráulico.</i>	59
<i>Tabla 11</i>	<i>Límites referenciales de contenido de agua e interpretación tribológica por tipo de lubricante.</i>	63
<i>Tabla 12</i>	<i>Resultados del contenido de agua en aceites hidráulicos mediante el método de Karl Fischer.</i>	64
<i>Tabla 13</i>	<i>Resultados de FTIR en las muestras de aceite hidráulico.</i>	71
<i>Tabla 14</i>	<i>Resultados del conteo de partículas en las muestras de aceite hidráulico.</i>	74
<i>Tabla 15</i>	<i>Resultados de Karl Fisher en las muestras de aceite hidráulico.</i>	78
<i>Tabla 16</i>	<i>Resultado FTIR de la línea base del aceite hidráulico.</i>	81
<i>Tabla 17</i>	<i>Resultado del conteo de partículas de la línea base del aceite hidráulico.</i>	81
<i>Tabla 18</i>	<i>Resultado Karl Fisher de la línea base del aceite hidráulico.</i>	82
<i>Tabla 19</i>	<i>Resultados de FTIR en las muestras de aceite hidráulico usado.</i>	83
<i>Tabla 20</i>	<i>Resultados de FTIR en las muestras de aceites con porcentaje de agua.</i>	87

INDICE DE ANEXOS

<i>Anexo 1</i>	<i>Equipo FTIR y accesorios utilizados para el análisis de aceites hidráulicos.</i>	<i>96</i>
<i>Anexo 2</i>	<i>Sistema de almacenamiento y dispensación de aceite hidráulico.....</i>	<i>96</i>
<i>Anexo 3</i>	<i>Etiqueta técnica y de seguridad del aceite hidráulico Valvoline AW ISO 68.....</i>	<i>97</i>
<i>Anexo 4</i>	<i>Preparación y pesaje de muestras de aceite hidráulico previo al análisis de laboratorio.</i>	<i>97</i>
<i>Anexo 5</i>	<i>Área de lavado de vehículos cercana al área de almacenamiento de la flota EMAC-EP.</i>	<i>98</i>
<i>Anexo 6</i>	<i>Autores del estudio durante la preparación de muestras de aceite para el análisis Karl Fischer.</i>	<i>98</i>
<i>Anexo 7</i>	<i>Equipo de titulación Karl Fischer utilizado para la determinación del contenido de agua en aceites hidráulicos.</i>	<i>99</i>
<i>Anexo 8</i>	<i>Reactivos y sistema de titulación Karl Fischer utilizados para la determinación del contenido de agua en aceites hidráulicos.....</i>	<i>99</i>
<i>Anexo 9</i>	<i>Muestras de aceites hidráulicos recolectadas en la flota EMAC-EP para análisis de laboratorio.....</i>	<i>100</i>
<i>Anexo 10</i>	<i>Interfaz del equipo FTIR mostrando el espectro de absorbancia obtenido en el análisis de aceite hidráulico.....</i>	<i>100</i>
<i>Anexo 11</i>	<i>Pantalla del contador de partículas mostrando el conteo por tamaño y el código ISO 4406 obtenido.....</i>	<i>101</i>
<i>Anexo 12</i>	<i>Resultados del análisis fisicoquímico del aceite hidráulico obtenidos mediante equipo ERASPEC Oil.....</i>	<i>101</i>
<i>Anexo 13</i>	<i>Autor durante la ejecución del método Karl Fischer para la determinación del contenido de agua en aceites hidráulicos.....</i>	<i>102</i>
<i>Anexo 14</i>	<i>Visualización de partículas de agua dispersas en la muestra de aceite hidráulico previo al análisis Karl Fischer.</i>	<i>102</i>
<i>Anexo 15</i>	<i>Determinación de la masa de agua utilizada para la preparación de muestras aceite- agua previo al análisis Karl Fischer.</i>	<i>103</i>
<i>Anexo 16</i>	<i>Emulsión agua-aceite observada durante la preparación de muestras para análisis.</i>	<i>103</i>
<i>Anexo 17</i>	<i>Tutor académico realizando correcciones y revisión del trabajo de titulación</i>	<i>104</i>

Anexo 18 Reporte automático del ensayo de contenido de agua por Karl Fischer en aceite nuevo sellado..... 105

Anexo 19 Reporte automático del ensayo de contenido de agua por Karl Fischer para aceite de manguera. 107

Anexo 20 Reporte automático del ensayo de contenido de agua por Karl Fischer para aceite de tanque..... 109

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la gestión eficiente de los aceites hidráulicos es fundamental para garantizar el buen funcionamiento y la longevidad de los sistemas hidráulicos en las flotas de vehículos. En la EMAC-EP, empresa encargada de la gestión de residuos y la limpieza urbana en la ciudad de Cuenca, se enfrenta a desafíos en el control y el mantenimiento de los aceites hidráulicos de su flota de 55 vehículos. La falta de un control riguroso del estado de los aceites, basado únicamente en las especificaciones proporcionadas por los fabricantes o distribuidores, ha generado preocupación por la degradación prematura de estos fluidos debido a factores ambientales, ciclos térmicos, contaminación cruzada y almacenamiento prolongado.

La carencia de un sistema que permita evaluar la condición real de los aceites almacenados dificulta la toma de decisiones sobre su uso, mantenimiento o descarte, lo que, a su vez, compromete la eficiencia operativa de los vehículos y aumenta los costos asociados a los mantenimientos correctivos. A pesar de que los aceites hidráulicos nuevos se adquieren conforme a especificaciones estándar, pueden sufrir alteraciones significativas durante su almacenamiento y antes de su uso en los sistemas hidráulicos, lo que requiere una caracterización más detallada y contextualizada.

Este estudio tiene como objetivo evaluar el estado de los aceites hidráulicos almacenados en la EMAC-EP, mediante análisis fisicoquímicos estandarizados (ASTM D6304, ASTM D664 e ISO 4406) para establecer una línea base técnica confiable. El propósito de esta investigación es proporcionar parámetros técnicos claros que permitan la toma de decisiones más fundamentadas sobre la aceptación, la reprocesamiento o el descarte de los aceites, lo que contribuirá a optimizar la gestión de inventarios, a mejorar los procesos de mantenimiento preventivo y a reducir los costos asociados a la flota de vehículos.

La importancia de este proyecto radica en la necesidad de contar con un sistema de control más eficiente y específico para los aceites hidráulicos utilizados en equipos y vehículos críticos de la EMAC-EP. La caracterización de los aceites permitirá asegurar su calidad y confiabilidad antes de su uso, previniendo fallas operativas y alargando la vida útil de los sistemas hidráulicos. Además, este proyecto contribuye a la sostenibilidad operativa de la empresa y optimiza los recursos, alineándose con las mejores prácticas de gestión ambiental y responsabilidad pública.

2. PROBLEMA DE ESTUDIO

La Empresa Pública Municipal de Aseo de Cuenca (EMA- EP) opera una flota de 55 vehículos que utilizan sistemas hidráulicos cuya eficiencia depende directamente del estado de los aceites lubricantes. Actualmente, el control de estos fluidos se basa únicamente en especificaciones de fábrica y/o del distribuidor, definidas en condiciones ideales que no contemplan factores como la humedad ambiental, los ciclos térmicos, el almacenamiento prolongado o la contaminación cruzada, que inciden en la degradación prematura del aceite (ASTM D7414; ISO 4406). Esta falta de contextualización impide conocer con objetividad la condición real de los aceites almacenados, comprometiendo la confiabilidad de los sistemas y elevando los costos por mantenimiento correctivo (Hong & Jeon, 2022; Jeon et al., 2022). La carencia de una línea base técnica institucional dificulta el establecimiento de criterios para aceptar o descartar el fluido. En este contexto, se requiere una caracterización sistemática de los aceites hidráulicos nuevos mediante técnicas normadas, como ASTM D6304 (agua), D664 (TAN) e ISO 4406 (contaminación sólida), que permita establecer parámetros de referencia confiables para fortalecer la gestión de mantenimiento y optimizar la disponibilidad operativa de la flota.

2.1 Antecedentes

Los sistemas hidráulicos se utilizan ampliamente en vehículos de servicio público debido a su alta capacidad de transmisión de potencia. Diversos estudios técnicos y normas internacionales establecen que la presencia de agua, la contaminación por partículas sólidas y la degradación química del aceite afectan directamente el desempeño y la vida útil de los componentes hidráulicos. No obstante, en la EMAC-EP no se cuenta con estudios que evalúen la condición fisicoquímica de los aceites hidráulicos nuevos durante su almacenamiento en condiciones ambientales reales.

2.2 Importancia y alcances

La importancia del presente estudio radica en la formulación de una línea base técnica a partir del análisis comparativo de aceites hidráulicos nuevos y usados, lo que permite conocer la evolución de sus propiedades fisicoquímicas. Esto facilitará la toma de decisiones sobre el mantenimiento, la reposición y el descarte del lubricante, optimizando la gestión del inventario y

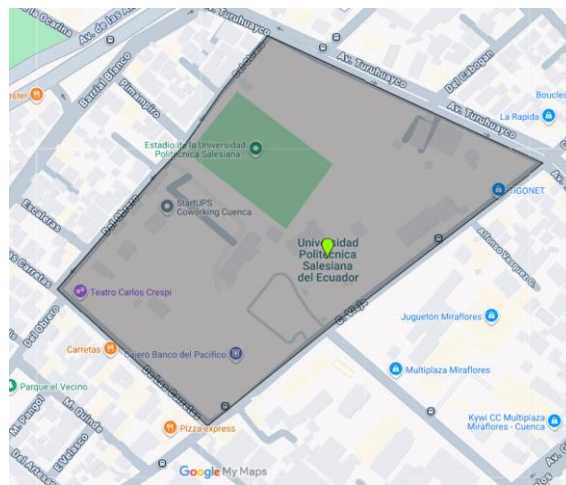
reduciendo las fallas en los sistemas hidráulicos. El alcance del trabajo se limita a la caracterización fisicoquímica del aceite, sin evaluar el desempeño mecánico de los componentes hidráulicos.

2.3 Delimitación

El presente proyecto se llevará a cabo en la Empresa Pública Municipal de Aseo de Cuenca (EMAC-EP), ubicada en la provincia del Azuay, ciudad de Cuenca, al sur del Ecuador, la cual se encuentra a una altitud aproximada de 2500 m.s.n.m. tal como se muestra en la Figura 1, cuenta con una extensión territorial de 70,59 km² y una población aproximada de 580.000 habitantes.

Figura 1

Ubicación de la UPS



Nota. Vista del área de intervención del proyecto institucional en la ciudad de Cuenca, provincia del Azuay. Tomado de (Google Maps, 2025).

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo General

Evaluar la condición de los aceites hidráulicos almacenados en la EMAC-EP mediante análisis fisicoquímicos normalizados, para establecer una línea base técnica que permita verificar su calidad antes del uso operativo

3.2 Objetivos específicos

- Identificar los sistemas hidráulicos presentes en la flota de la EMAC-EP y los tipos de aceite utilizados, mediante la revisión de la documentación técnica y de los registros operativos, con el fin de establecer una base de datos estructurada del inventario de lubricantes.
- Caracterizar las propiedades fisicoquímicas de los aceites hidráulicos almacenados, mediante análisis de laboratorio normados (ASTM e ISO), para evaluar su condición real antes del uso.
- Analizar el nivel de contaminación por partículas sólidas y contenido de agua en los aceites hidráulicos, utilizando técnicas establecidas en normas ISO 4406, ASTM D6304 y ASTM D664, con el propósito de detectar posibles deterioros o riesgos de aplicación.
- Establecer parámetros de referencia técnicos a partir de los resultados obtenidos, mediante la comparación con las especificaciones del fabricante y la literatura especializada, para construir una línea base de evaluación de aceites hidráulicos en almacenamiento.

4. CAPITULO I: IDENTIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS HIDRÁULICOS Y TIPOS DE ACEITE UTILIZADOS EN LA FLOTA DE LA EMAC-EP

La Empresa Pública Municipal de Aseo de Cuenca (EMAC-EP) cuenta con una flota diversa de vehículos y maquinaria especializada destinada a la gestión integral de residuos sólidos urbanos. Esta flota incluye camiones compactadores de carga posterior, recolectores de carga lateral y frontal, barredoras mecánicas, así como equipos de apoyo tales como retroexcavadoras, plataformas elevadoras, minicargadores y maquinaria auxiliar utilizada en operativos de limpieza y mantenimiento urbano.

El rendimiento operativo de estos vehículos depende en gran medida del correcto funcionamiento de sus sistemas hidráulicos, que constituyen el elemento fundamental para la ejecución de procesos como la compactación de residuos, la elevación de contenedores, el accionamiento de brazos articulados, la apertura y cierre de compuertas, la nivelación y la manipulación de plataformas, entre otros. Dado que estos mecanismos operan bajo condiciones de alta demanda, ciclos de carga repetitivos y ambientes de operación exigentes, requieren el uso de aceites hidráulicos específicos que garanticen eficiencia, protección y una vida útil prolongada de los componentes mecánicos.

En este contexto, la correcta selección, identificación y control de los lubricantes hidráulicos resultan esenciales para asegurar la operatividad continua de la flota, reducir fallos prematuros, disminuir costos de mantenimiento y mejorar la planificación logística de insumos técnicos. No obstante, la diversidad de marcas, modelos y capacidades de los equipos genera variabilidad en los tipos de aceite recomendados por los fabricantes, lo que vuelve indispensable un levantamiento técnico detallado.

El presente capítulo tiene como objetivo identificar los sistemas hidráulicos de la flota de la EMAC-EP y los tipos de aceites utilizados, a partir de la revisión de la documentación técnica, las fichas de fabricante, los manuales de operación y los registros operativos internos. A través de este análisis se establece una base de datos estructurada que permitirá conocer las especificaciones reales de cada equipo, los estándares de los lubricantes empleados y las necesidades técnicas de abastecimiento.

La información recopilada constituye el primer paso para la conformación de un inventario técnico de lubricantes, herramienta fundamental para mejorar la gestión del mantenimiento preventivo, optimizar los tiempos de intervención, evitar incompatibilidades entre fluidos, y garantizar la continuidad operativa de los sistemas hidráulicos críticos dentro de la gestión de residuos sólidos del cantón Cuenca.

4.1 Clasificación sistemas hidráulicos presentes

Los sistemas hidráulicos de la flota vehicular de la Empresa Pública Municipal de Aseo de Cuenca (EMAC-EP) desempeñan un rol fundamental en las operaciones de recolección, compactación y descarga de residuos sólidos urbanos. A partir de la revisión de los registros operativos y de la documentación técnica de los vehículos, los sistemas hidráulicos identificados pueden clasificarse según su función operativa, lo que permite una mejor comprensión de las exigencias a las que se encuentra sometido el aceite hidráulico utilizado en cada aplicación.

4.1.1 Sistema de compactación trasera (Rear-Load Compactor)

Este sistema constituye uno de los mecanismos fundamentales en los procesos de recolección de residuos urbanos. Su funcionamiento se basa en un motor hidráulico acoplado a la toma de fuerza del vehículo, que transmite la energía necesaria para accionar la placa compactadora, encargada de reducir significativamente el volumen de los desechos depositados en la tolva trasera. Esta etapa de compactación permite optimizar la capacidad de carga del camión, reducir los tiempos operativos y disminuir la frecuencia de traslados a los sitios de disposición final.

El conjunto hidráulico del sistema integra diversos componentes esenciales, entre ellos el depósito de aceite, responsable de almacenar y mantener la temperatura adecuada del fluido; la bomba hidráulica, generalmente de tipo engranaje debido a su robustez y fiabilidad; así como válvulas direccionales, cilindros de compresión, filtros y tuberías de alta presión que conforman el circuito por el cual circula el aceite. Cuando la válvula direccional cambia de posición, se controla el sentido del flujo hidráulico que permite el avance o el retroceso de la placa compactadora, garantizando ciclos eficientes de acumulación y empuje del material. Una vez finalizada cada fase

del proceso, el fluido retorna al tanque para su recirculación, completando así un circuito de operación continuo y cerrado. (CL Vehicles, s. f.)

Componentes principales:

- Depósito de aceite hidráulico con sistema de filtración
- Bomba hidráulica accionada por la toma de fuerza (PTO)
- Válvulas de control direccional
- Cilindros hidráulicos de doble efecto
- Mangueras y tuberías de alta presión

La Figura 2 muestra el camión recolector equipado con un sistema de compactación trasera, permitiendo identificar de manera general los principales componentes hidráulicos involucrados en el proceso de compactación de residuos.

Figura 2

Camión recolector con sistema de compactación trasera.



Nota. Adaptado de *Servicio de recolección de desechos y residuos sólidos*, por EMAC EP, s. f., Empresa Pública Municipal de Aseo de Cuenca (<https://emac.gob.ec/servicio-de-recoleccion-de-desechos-y-residuos-solidos/>).

4.1.2 Sistema hidráulico de carga y descarga de contenedores

Este sistema se encuentra presente en los camiones tipo contenedor utilizados por la EMAC-EP, y tiene como función principal la elevación, manipulación y descarga controlada de contenedores de residuos sólidos. El accionamiento se realiza mediante brazos hidráulicos que permiten automatizar las operaciones de carga, reduciendo la intervención manual y mejorando las condiciones de seguridad y eficiencia.

El sistema emplea componentes hidráulicos similares a los del sistema de compactación, operando bajo condiciones de presión y caudal que requieren un control adecuado de la calidad del aceite hidráulico para evitar fallas operativas.

Componentes principales:

- Brazos hidráulicos de elevación
- Cilindros hidráulicos de accionamiento
- Válvulas de control direccional
- Depósito de aceite hidráulico
- Líneas hidráulicas de alta presión

La Figura 3 muestra la unidad de recolección de residuos sólidos equipada con un sistema hidráulico de carga y descarga de contenedores, lo que permite contextualizar el funcionamiento del circuito hidráulico utilizado para la manipulación de residuos.

Figura 3

Unidad de recolección de residuos sólidos con sistema de elevación y descarga de carga.



Nota. El vehículo mostrado pertenece a la flota operativa de la ciudad de Cuenca. Adaptado de *Servicio de recolección de desechos y residuos sólidos*, por EMAC EP, s. f.

(<https://emac.gob.ec/servicio-de-recoleccion-de-desechos-y-residuos-solidos/>).

4.1.3 Sistemas hidráulicos auxiliares

De manera complementaria, los vehículos de la flota de la EMAC-EP incorporan sistemas hidráulicos auxiliares destinados al accionamiento de mecanismos secundarios, tales como compuertas, seguros hidráulicos y dispositivos de apoyo durante las operaciones de recolección y descarga.

Estos sistemas comparten elementos hidráulicos comunes, por lo que la calidad del aceite hidráulico influye directamente en su correcto funcionamiento y en la vida útil de los componentes, reforzando la necesidad de contar con criterios técnicos para la evaluación del fluido antes de su uso operativo.

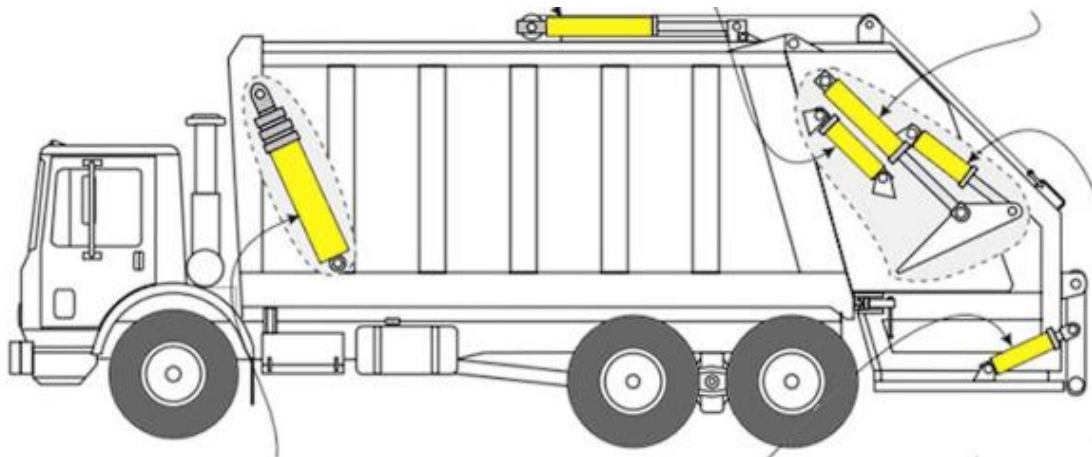
Componentes principales:

- Válvulas auxiliares de control
- Cilindros hidráulicos secundarios
- Mangueras y conexiones hidráulicas

La Figura 4 muestra los sistemas hidráulicos auxiliares presentes en los vehículos de la flota de la EMAC-EP, que accionan mecanismos secundarios de apoyo durante las operaciones de recolección y descarga.

Figura 4

Sistemas hidráulicos auxiliares.



Nota. Adaptado de *Garbage Truck Hydraulics Maintenance & Maintain*, por CSC TRUCKS, s. f. (<https://www.csc-trucks.com/info/garbage-truck-hydraulics-maintenance-maintain-84424639.html>).

4.2 Caracterización operativa de la flota vehicular de la EMAC-EP

La flota vehicular de la Empresa Pública Municipal de Aseo de Cuenca (EMAC-EP) está destinada principalmente a la recolección, el transporte y la descarga de residuos sólidos urbanos, actividades que requieren un uso intensivo y continuo de los sistemas hidráulicos. Las operaciones se desarrollan en entornos urbanos, con ciclos frecuentes de arranque y parada, variaciones de carga y funcionamiento prolongado durante las jornadas laborales.

Los sistemas hidráulicos de los vehículos operan en condiciones de alta exigencia, especialmente durante los procesos de compactación y manipulación de contenedores, lo que genera esfuerzos mecánicos y térmicos sobre el aceite hidráulico. Adicionalmente, factores ambientales propios de la ciudad de Cuenca, como la altitud aproximada de 2500 m s. n. m., la humedad ambiental y las variaciones de temperatura, pueden influir en la degradación progresiva del fluido hidráulico durante su almacenamiento y uso operativo.

Estas condiciones operativas resaltan la importancia de contar con un control adecuado del estado fisicoquímico del aceite hidráulico, ya que su deterioro puede comprometer la eficiencia, la confiabilidad y la seguridad de los sistemas hidráulicos de la flota.

4.3 Modelos de vehículos y sistemas hidráulicos identificados en la flota EMAC-EP

A partir de la revisión de los registros técnicos institucionales, se identificaron los principales modelos de vehículos que conforman la flota de la EMAC-EP, los cuales incorporan sistemas hidráulicos destinados a la compactación de residuos y a la carga y descarga de contenedores. Los vehículos pertenecen a marcas reconocidas a nivel internacional, lo que garantiza estándares técnicos similares en el diseño y la operación de sus sistemas hidráulicos.

Los modelos analizados presentan motores de gran cilindrada y configuraciones robustas, diseñadas para operar en condiciones de trabajo pesado. Esta diversidad de modelos y años de fabricación implica variaciones en los regímenes de operación de los sistemas hidráulicos, lo que refuerza la necesidad de establecer una línea base técnica que permita evaluar objetivamente y de manera estandarizada la condición del aceite hidráulico. A continuación, se detallan los diferentes tipos de vehículos en la flota tal como se muestra en la Tabla 1:

Tabla 1*Inventario de vehículos de la flota EMAC-EP incluidos en el estudio.*

Tipo de vehículo	Marca	Modelo	Año de fabricación	Cilindraje
Recolector carga posterior	DAF	CF 85 IV	2019	12 900 cc
Recolector carga posterior	DAF	CF 85 IV	2019	12 900 cc
Recolector carga posterior	DAF	CF 85 IV	2019	12 900 cc
Recolector carga posterior	DAF	CF 85 IV	2019	12 900 cc
Recolector carga posterior	DAF	CF 85 IV	2019	12 900 cc
Contenedor	SCANIA	P360 6×4	2022	12 700 cc
Contenedor	SCANIA	P360 6×4	2022	12 700 cc
Recolector carga posterior	IVECO	TrakkerAT380T3	2022	12 880 cc
Recolector carga posterior	IVECO	TrakkerAT380T3	2023	12 880 cc
Recolector carga posterior	IVECO	TrakkerAT380T3	2023	12 880 cc
Recolector carga posterior	IVECO	TrakkerAT380T38	2023	12 880 cc
Recolector carga posterior	IVECO	Trakker AT380T38	2023	12 880 cc
Recolector carga posterior	IVECO	Trakker AT380T38	2023	12 880 cc

Nota. Adaptado de *Listado de Vehículos de la Emac Ep*, por **Ing. Juan Cendón**, 2024, por EMAC EP.

4.3.1 Características técnicas de los sistemas hidráulicos

Los sistemas hidráulicos de la flota de la EMAC-EP están diseñados para realizar tareas exigentes como la compactación de residuos y la manipulación de contenedores. El rendimiento de estos sistemas depende de la calidad y características del aceite hidráulico, así como de las especificaciones técnicas de los componentes hidráulicos. A continuación, se presentan las características clave de los sistemas hidráulicos en términos generales, incluyendo las presiones de operación y las funciones básicas de los sistemas hidráulicos de los vehículos de la EMAC-EP.

- **Funcionamiento del Sistema Hidráulico**

El funcionamiento básico de los sistemas hidráulicos se basa en la circulación de un fluido a través de un conjunto de componentes: bombas, válvulas, cilindros y actuadores hidráulicos. Estos sistemas operan en un ciclo cerrado, donde el fluido es aspirado por la bomba, se transmite a través de las válvulas que controlan el flujo y la dirección, y finalmente actúa sobre los actuadores hidráulicos (cilindros o motores) para realizar el trabajo necesario (compresión, elevación, etc.).

- **Presiones de Operación**

Las presiones de trabajo de los sistemas hidráulicos suelen estar entre 1500 y 3000 psi, según la tarea que se esté realizando. Esta presión es la que permite que el fluido hidráulico transmita la energía necesaria para mover componentes como cilindros, bombas y válvulas, tal y como se aprecia en la Tabla 2.

Tabla 2

Parámetros operativos de los componentes del sistema hidráulico.

Componente	Función en el Sistema	Presión de Trabajo (psi)
Bomba de Engranajes	Generación de flujo y presión	1500 – 2500
Válvulas de Control	Regulación de flujo y dirección	Hasta 3000
Cilindros Hidráulicos	Actuación lineal (compactación)	1500 – 2500
Motor Hidráulico	Actuación rotativa	1500 – 2500
Acumulador	Almacenamiento de energía	2000
Sistema de Enfriamiento	Disipación de calor (Radiador)	50 – 150

Nota. Los rangos de presión representan los valores estándar para sistemas de potencia fluida en maquinaria móvil. Adaptado de *Manual de Hidráulica Industrial* por Vickers-Eaton. Recuperado de <https://es.scribd.com/document/767646130/Vickers-Eaton-Hydraulics>

4.3.2 Aceite hidráulico empleado en la flota EMAC-EP

El aceite **AW Hydraulic Oil ISO 68** es un aceite hidráulico anti-desgaste utilizado en sistemas hidráulicos de maquinaria pesada, formulado para proveer un efectivo control sobre el desgaste, oxidación, herrumbre, formación de espuma y variaciones de volumen (VALVOLINE). Este aceite es adecuado para operar en condiciones de alta presión y temperatura, y ofrece protección contra el desgaste, la corrosión y la oxidación. A continuación, las características técnicas del aceite ISO 68, tal como se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3

Especificaciones Técnicas del Lubricante Valvoline AW Hydraulic Oil 68.

Propiedades típicas	Valor
Densidad, a 15,6 °C en g/cm³	0.885
Viscosidad, a 40 °C en cSt	68

Viscosidad, a 100 °C en cSt	9.4
Índice de viscosidad	95
Punto de fluidez, en °C	-15
Punto de inflamabilidad, COC °F	230

Nota. Adaptado de la Ficha Técnica de Producto *AW Hydraulic Oil AW 68* por Valvoline Global. Recuperado de:
<https://www.valvolineglobal.com/4ab31d/globalassets/latam/argentina/argentina-pi-sheets/ft-aw-hydraulic-oil-aw-68.pdf>

5. CAPÍTULO II: CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DE ACEITES HIDRÁULICOS ALMACENADOS MEDIANTE ENSAYOS NORMADOS (ASTM/ISO) PARA EVALUAR SU CONDICIÓN ANTES DEL USO.

5.1 Diseño metodológico del estudio

El presente estudio se desarrolla bajo un enfoque cuantitativo, con alcance descriptivo y comparativo, orientado a la caracterización fisicoquímica y al control de la contaminación de los aceites hidráulicos almacenados en la Empresa Pública Municipal de Aseo de Cuenca (EMAC-EP). La metodología se basa en la realización de ensayos de laboratorio normalizados, conforme a las normas ASTM e ISO, con el objetivo de evaluar el estado del lubricante antes de su uso operativo. (ASTM, 2018, 2019, 2020; ISO - International Organization for Standardization, 2021)

La unidad de análisis corresponde a lotes de aceites hidráulicos almacenados en las instalaciones de la EMAC-EP, y que forman parte de la cadena de suministro de la empresa. El estudio se limita a evaluar el estado fisicoquímico del aceite en almacenamiento, sin considerar el desempeño mecánico de los sistemas hidráulicos.

La metodología comprende la identificación y clasificación del lubricante, la obtención de muestras representativas, la determinación de propiedades fisicoquímicas críticas y la evaluación del nivel de contaminación por partículas sólidas, conforme a la norma ISO 4406 (ISO - International Organization for Standardization, 2021). Los resultados se comparan con valores de referencia del fabricante y literatura especializada, permitiendo establecer criterios técnicos de evaluación para la construcción de una línea base técnica institucional. En la Tabla 4 se presentan los ensayos fisicoquímicos realizados en el estudio, junto con las normas técnicas aplicadas a cada parámetro evaluado.

Tabla 4

Parámetros evaluados, normas aplicadas y técnicas de análisis empleadas en el estudio.

Parámetro evaluado	Norma aplicada	Técnica de análisis
Viscosidad cinemática	ASTM D445	Espectroscopía FTIR

Número ácido total (TAN)	ASTM D664	Espectroscopía FTIR
Contenido de agua	ASTM D6304	Titulación Coulométrica
Contaminación por partículas sólidas	ISO 4406	Conteo de partículas

Nota. Elaboración propia con base en (ASTM, 2018, 2019, 2020; ISO - International Organization for Standardization, 2021).

5.2 Identificación, clasificación y documentación técnica de los aceites hidráulicos almacenados

Previo a la caracterización fisicoquímica mediante ensayos de laboratorio, se llevó a cabo la identificación técnica y documental de los aceites hidráulicos almacenados en la Empresa Pública Municipal de Aseo de Cuenca (EMAC-EP), con el propósito de definir adecuadamente la población de estudio y asegurar la trazabilidad del lubricante a lo largo del proceso de análisis.

Esta etapa metodológica se desarrolló como un paso fundamental previo al análisis experimental, ya que permite establecer con precisión el:

- Tipo de fluido
- Su clasificación normativa
- Las propiedades nominales declaradas por el fabricante

Evitando interpretaciones erróneas durante la evaluación de los resultados. Para ello, el procedimiento contempló la identificación del producto a partir de la información contenida en la etiqueta del envase, la clasificación del fluido conforme a normas técnicas aplicables, y la revisión de la documentación técnica oficial del fabricante, específicamente la ficha técnica del producto (TDS) y la hoja de datos de seguridad (SDS).

5.2.1 Identificación del aceite a partir de la etiqueta

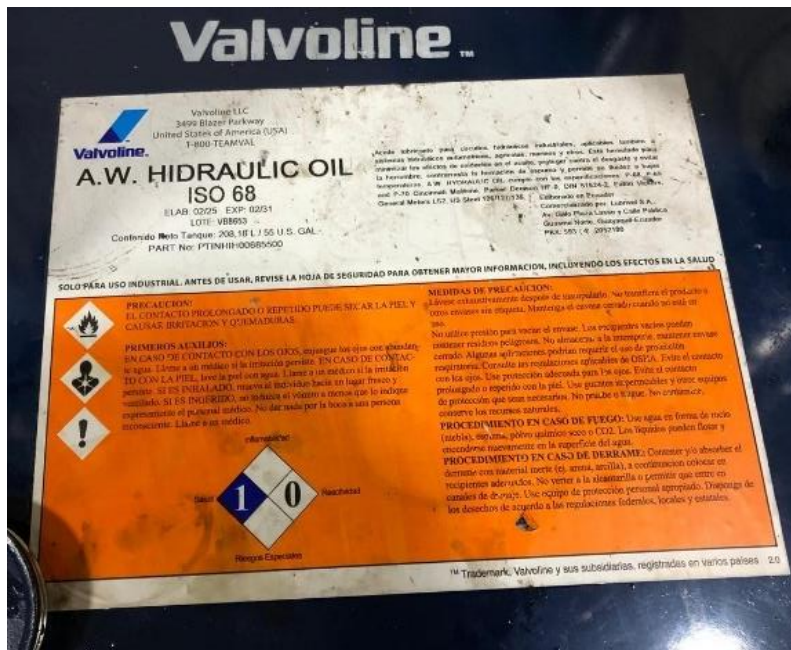
La identificación del aceite hidráulico se realizó mediante la inspección visual directa de las etiquetas originales de los envases almacenados en la Empresa Pública Municipal de Aseo de

Cuenca (EMAC-EP) como se aprecia en la Figura 5. Esta información permitió identificar el tipo de fluido, el grado de viscosidad, las normas u homologaciones declaradas, así como los datos de trazabilidad necesarios para el análisis posterior.

A partir de la lectura de la etiqueta, se registraron el nombre comercial del producto, el tipo de lubricante (aceite hidráulico o fluido de transmisión automática), el grado de viscosidad ISO, cuando aplica, el número de lote, la presentación del envase y el estado de integridad del sello. Esta información constituye la base para la clasificación normativa del fluido y la comparación con las propiedades nominales declaradas por el fabricante en su documentación técnica.

Figura 5

Etiqueta AW ISO 68



Nota. Fotografía tomada por los autores en las instalaciones de la EMAC-EP (2025).

La Tabla 5 resume la información de identificación y trazabilidad de los aceites hidráulicos almacenados, a partir de los datos declarados en la etiqueta del fabricante:

Tabla 5

Identificación y trazabilidad de los aceites hidráulicos almacenados.

Producto	Tipo de fluido	ISO VG	Normas declaradas	Presentación	Estado del envase
AW Hydraulic Oil	Hidráulico antidesgaste	68	DIN 51524-2	Tambor	Íntegro

Nota. Elaboración propia a partir de la información observada en las etiquetas de los envases almacenados en la EMAC-EP (2025).

5.2.3 Documentación técnica del fabricante (TDS y SDS)

Con el fin de establecer los valores nominales de referencia para la evaluación de los aceites hidráulicos almacenados, se revisó la documentación técnica oficial del fabricante, específicamente la Ficha Técnica del Producto (TDS) y la Hoja de Datos de Seguridad (SDS). Estos documentos constituyen la principal fuente de información sobre las propiedades fisicoquímicas típicas, así como sobre las condiciones recomendadas de almacenamiento y manejo seguro del lubricante.

La información contenida en las fichas técnicas no corresponde a resultados experimentales del presente estudio, sino a propiedades declaradas por el fabricante, utilizadas como criterios de referencia para la comparación con los resultados obtenidos mediante los ensayos de laboratorio (Valvoline, 2023, 2024).

En este contexto, la ficha técnica del aceite hidráulico Valvoline AW Hydraulic Oil ISO VG 68 proporciona valores típicos de viscosidad, índice de viscosidad, densidad y punto de inflamación, mientras que la del fluido Valvoline Dexron III-H / Mercon ATF detalla parámetros característicos relacionados con su rango de viscosidad y su estabilidad térmica, información necesaria para su correcta identificación y diferenciación frente a los aceites hidráulicos industriales.

Las hojas de datos de seguridad se utilizaron para corroborar las recomendaciones de almacenamiento, las condiciones de manipulación segura y la clasificación de peligros, asegurando

el manejo adecuado de los aceites en bodega conforme a las indicaciones del fabricante (Valvoline, 2023, 2024).

A continuación, la Tabla 6 presenta los valores nominales de referencia, extraídos de la ficha técnica del fabricante, correspondientes al aceite hidráulico almacenado en el presente estudio.

Tabla 6

Propiedades fisicoquímicas nominales del aceite Valvoline AW Hydraulic Oil ISO VG 68.

Propiedad	Unidad	Valor nominal
Densidad a 15,6 °C	g/cm ³	0,885
Viscosidad cinemática a 40 °C	cSt	68
Viscosidad cinemática a 100 °C	cSt	9,4
Índice de viscosidad	—	95
Punto de inflamabilidad (COC)	°F	230
Punto de fluidez	°C	-15

Nota. Valores nominales declarados en la ficha técnica del fabricante. Elaboración propia con base en (Valvoline, 2024).

5.3 Protocolo de muestreo de aceites hidráulicos almacenados

El muestreo de aceites hidráulicos constituye una etapa crítica del análisis fisicoquímico, ya que la representatividad de la muestra influye directamente en la confiabilidad de los resultados de laboratorio. En el presente estudio, el protocolo de muestreo se diseñó con el objetivo de obtener muestras representativas de aceites hidráulicos en almacenamiento, minimizando el riesgo de contaminación externa y garantizando la trazabilidad del lubricante a lo largo de todo el proceso de análisis.

El muestreo se realizó exclusivamente sobre aceites almacenados en envases originales, previo a su uso operativo, siguiendo criterios técnicos establecidos en normas

internacionales para el manejo y muestreo de lubricantes. Este enfoque permite evaluar la condición real del aceite antes de su aplicación, diferenciando posibles alteraciones atribuibles al almacenamiento de aquellas generadas durante el servicio (ASTM International, 1995).

Las actividades de muestreo incluyeron la selección del envase, la verificación del estado físico del recipiente, la limpieza del punto de extracción, la recolección del volumen de muestra requerido y el rotulado adecuado del recipiente, asegurando la integridad y trazabilidad de la muestra hasta su análisis en laboratorio. Adicionalmente, se aplicaron medidas de control de contaminación y cadena de custodia, con el fin de preservar las características originales del lubricante (ASTM International, 1995; ISO - International Organization for Standardization, 2021).

El método descrito garantiza que las muestras recolectadas reflejen de manera representativa la condición real del aceite hidráulico en almacenamiento, lo que permite que los análisis fisicoquímicos posteriores evalúen fielmente el estado del lubricante antes de su uso operativo.

La Figura 6 muestra la bomba de muestreo empleada para la extracción de aceites hidráulicos almacenados, con el fin de garantizar la obtención de muestras representativas y minimizar el riesgo de contaminación externa.

Figura 6

Bomba de muestreo utilizada para el muestreo de aceites hidráulicos almacenados.



Nota. Imagen adaptada de *Guía para seleccionar accesorios de muestreo de aceite*, por Noria Corporation (s. f.), <https://noria.mx/lube-learn/analisis-de-aceite/guia-para-seleccionar-accesorios-de-muestreo-de-aceite/>

5.3.4.1 Codificación de las muestras

El código de identificación de las muestras fue definido mediante una nomenclatura estandarizada compuesta por términos separados por guiones bajos, con el propósito de asegurar una adecuada trazabilidad, la identificación del origen y la correcta interpretación de los resultados obtenidos en los análisis de laboratorio.

Esta codificación permite identificar de manera clara y sistemática la empresa propietaria del lubricante, el tipo de aceite según su clasificación de viscosidad, el estado del aceite, el origen físico de la muestra y, cuando corresponde, la realización de un doble análisis como parte del control de calidad y verificación de la repetibilidad de los resultados, tal como se muestra en la Tabla 7:

Tabla 7

Estructura de la codificación de las muestras de aceite hidráulico.

Término	Ejemplo	Descripción técnica
Empresa	EMAC	Identifica a la empresa propietaria del sistema o equipo muestreado
Tipo de aceite	ISO68	Clasificación de viscosidad del aceite según norma ISO
Estado del aceite	N / U	N: aceite nuevo; U: aceite usado
Línea base técnica	LB	Identifica la línea base técnica del aceite analizado.

Identificador del vehículo	AMA-531	Código o placa del equipo del cual se obtuvo la muestra.
Fuente de la muestra	T o M	. T: muestra obtenida del tanque; M: muestra obtenida de la manguera.
Número de manguera o tanque	01 / 02	Indica la manguera o tanque de donde se obtuvo la muestra: 01 para manguera 1, 02 para manguera 2 o 01 para tanque 1 y 02 para tanque 2.
Repetición (opcional)	D	Indica análisis duplicado para control de calidad

Nota. Elaboración propia.

Asimismo, en la Tabla 8, se observan ejemplos reales de los códigos de identificación de muestras empleados durante el análisis de laboratorio. Estos códigos corresponden a las muestras recolectadas y analizadas durante el desarrollo del presente estudio, lo que evidencia la correcta aplicación de la nomenclatura definida para la codificación de las muestras de aceite. La estandarización de dicha codificación permitió garantizar la trazabilidad de cada muestra, facilitar la asociación entre los resultados analíticos, su origen y asegurar así la confiabilidad de los datos obtenidos.

Tabla 8

Ejemplos de codificación de muestras analizadas.

Nombre	Interpretación
EMAC_ISO68_U_AMA-531	Aceite ISO 68 usado de la empresa EMAC, recolectado del depósito de aceite de un vehículo identificado con la placa AMA-531.

EMAC_ISO68_U_AMA-531_D	Aceite ISO 68 usado en el vehículo AMA-531, sometido a un doble análisis de laboratorio para verificar la repetibilidad de los resultados.
EMAC_ISO68_U_AMA-1092	Aceite ISO 68 usado, tomado del depósito de aceite del vehículo identificado con la placa AMA-1092.
ISO_68_EMAC_LB_N	Aceite ISO 68 de nueva apertura, recolectado inmediatamente después de abrir el barril del aceite.
EMAC_ISO68_N_MG01_D	Aceite ISO 68 nuevo, recolectado de la manguera 1, sometido a un análisis duplicado para verificar la consistencia de los resultados.

Nota. Todos los códigos presentados corresponden a muestras reales incluidas en la base de datos experimental del presente estudio.

5.5 Procedimiento de análisis de laboratorio

El procedimiento de análisis de laboratorio se desarrolló con el propósito de caracterizar la condición fisicoquímica y el nivel de contaminación de los aceites hidráulicos almacenados, previo a su utilización en los sistemas hidráulicos de la flota. Para ello, se aplicaron métodos de ensayo normalizados conforme a las normas técnicas internacionales ASTM e ISO, que establecen criterios reproducibles y comparables para la evaluación de aceites lubricantes industriales (ASTM International, 2018, 2020, 2024; ISO, 2021).

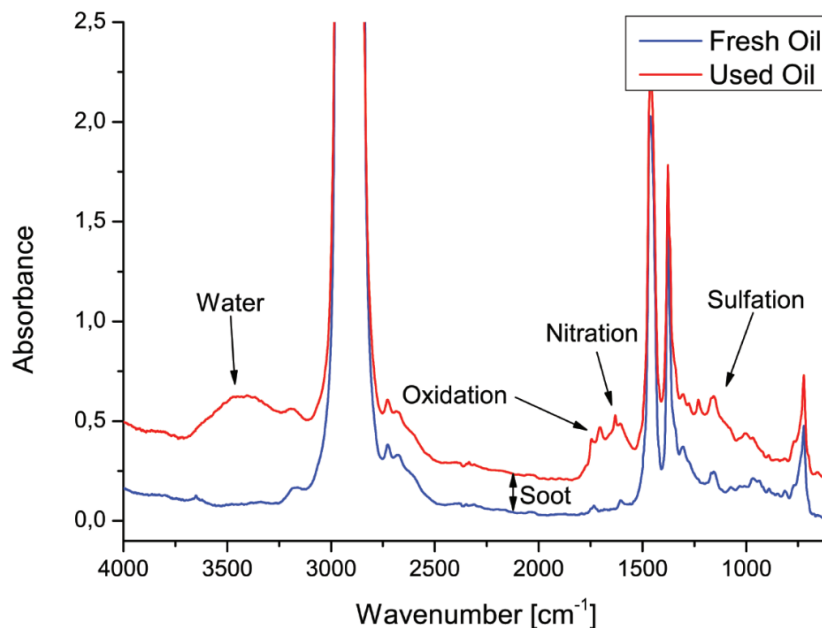
Los ensayos se realizaron en condiciones controladas de laboratorio, empleando equipos con precisión de grado analítico y siguiendo los procedimientos establecidos en cada norma aplicable. Este enfoque permitió garantizar la confiabilidad, la repetibilidad y la trazabilidad de los resultados obtenidos, evitando la influencia de factores externos y asegurando la validez técnica de la información generada.

5.5.1 Equipos utilizados

Previo a la descripción de los equipos utilizados, es necesario explicar de manera general la interpretación de los espectros obtenidos mediante espectroscopía de infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR). Las gráficas FTIR permiten analizar el estado fisicoquímico del aceite hidráulico a partir de la absorbancia registrada en diferentes números de onda, donde cada región del espectro está asociada a compuestos químicos específicos y a procesos de degradación tales como oxidación, nitración, sulfatación, presencia de agua y hollín. La comparación de espectros de aceite nuevo y usado facilita la identificación de cambios químicos atribuibles al envejecimiento del lubricante durante su almacenamiento o uso. En la Figura 7 se representan los principales parámetros evaluados mediante FTIR, lo que evidencia las regiones espectrales características asociadas a la degradación química del aceite hidráulico y permite visualizar las diferencias entre un lubricante en condición inicial y uno sometido a envejecimiento.

Figura 7

Ejemplos de espectros FTIR correspondientes a un aceite hidráulico nuevo y a un aceite usado.



Nota. Adaptado de “Used-oil Analysis Using a Portable FTIR Spectrometer”, un artículo sobre el espectrómetro FTIR portátil **ERASPEC OIL** desarrollado por *eralytics GmbH* (2014), que permite realizar análisis de estado de aceites in situ mediante espectroscopía infrarroja (*Eralytics*, 2014).

La Figura 7 ilustra la comparación entre los espectros FTIR de un aceite hidráulico nuevo y uno usado, lo que permite identificar visualmente las principales regiones del espectro asociadas a procesos de degradación del lubricante. En la gráfica se observan incrementos de absorbancia en zonas relacionadas con la presencia de agua, oxidación, nitración, sulfatación y hollín, lo que refleja cambios químicos ocurridos durante el almacenamiento o el uso del aceite. Esta representación facilita la comprensión de los parámetros evaluados posteriormente mediante el análisis FTIR y justifica el empleo de esta técnica como herramienta principal para el diagnóstico del estado fisicoquímico del aceite hidráulico.

Para la realización de los análisis fisicoquímicos de las muestras de aceite hidráulico se emplearon equipos de laboratorio especializados, seleccionados en función del parámetro a evaluar y de su compatibilidad con métodos de ensayo normalizados. El uso de estos equipos permitió obtener mediciones confiables, repetibles y técnicamente comparables, fundamentales para caracterizar el estado del aceite durante su almacenamiento.

Los principales equipos utilizados en el desarrollo de los ensayos fueron los siguientes:

La Figura 8 muestra el analizador FTIR Eraspec Oil utilizado para la caracterización fisicoquímica del aceite hidráulico mediante transformada de Fourier de infrarrojo.

Figura 8

Analizador FTIR Eraspec Oil.



Nota. Fotografía tomada por los autores en los laboratorios de tribología en la UPS.

Analizador FTIR: utilizado para evaluar el estado fisicoquímico del aceite hidráulico mediante espectroscopía de infrarrojo por transformada de Fourier. El equipo permite identificar procesos de degradación química, como oxidación, nitración y sulfatación, así como la presencia de agua y hollín, facilitando el diagnóstico del lubricante durante su almacenamiento o uso.

La Figura 9 muestra el sistema de titulación automática Metrohm, utilizado para la determinación del número ácido total (TAN) del aceite hidráulico, lo que permite evaluar variaciones en la acidez del fluido asociadas a procesos de oxidación y degradación química.

Figura 9

Sistema de titulación automática Metrohm.



Nota. Fotografía tomada por los autores en los laboratorios de tribología en la UPS.

- **Titulador potenciométrico**, empleado para la determinación del número ácido total (TAN) y del número base total (TBN) del aceite. El equipo permite identificar variaciones en la acidez del fluido, asociadas a procesos de oxidación y degradación química durante el almacenamiento.

La Figura 10 muestra el equipo de titulación coulométrica Karl Fischer utilizado para la determinación del contenido de agua en muestras de aceite hidráulico, permitiendo la detección de pequeñas cantidades de humedad que pueden afectar el desempeño y la vida útil del fluido.

Figura 10

Equipo de titulación coulométrica Karl Fischer.



Nota: Fotografía tomada por los autores en los laboratorios de tribología de la UPS.

- **Titulador coulométrico**, utilizado para medir el contenido de agua en muestras de aceite hidráulico. Este método es altamente sensible y permite detectar pequeñas cantidades de humedad que pueden afectar negativamente el desempeño y la vida útil del fluido.

La Figura 11 muestra el contador portátil de partículas modelo YJS-150, utilizado para la determinación del nivel de contaminación por partículas sólidas en muestras de aceite hidráulico,

permitiendo su clasificación conforme a la norma ISO 4406 para la evaluación del grado de limpieza del fluido.

Figura 11

Contador portátil de partículas (YJS-150).



Nota. Fotografía tomada por los autores en los laboratorios de tribología de la UPS.

- El **contador portátil de partículas modelo YJS-150** fue utilizado para la determinación del nivel de contaminación por partículas sólidas presentes en las muestras de aceite hidráulico. Este equipo permite cuantificar y clasificar partículas en función de su tamaño, proporcionando códigos de limpieza conforme a la norma **ISO 4406**, ampliamente empleada para la evaluación del grado de limpieza de fluidos hidráulicos.

El análisis mediante este equipo resulta fundamental para identificar el riesgo potencial de desgaste abrasivo en componentes hidráulicos sensibles, tales como bombas, válvulas y

servoválvulas, especialmente en aceites almacenados donde puede ocurrir ingreso de contaminantes sólidos por manipulación o condiciones inadecuadas de almacenamiento

5.7 Criterios de evaluación y valores de referencia para aceites hidráulicos ISO VG 68

Antes de la presentación y el análisis de los resultados experimentales, es necesario establecer los criterios técnicos de referencia que permitan evaluar el estado de los aceites hidráulicos analizados. Estos valores de referencia constituyen la base metodológica para la interpretación de los resultados de los ensayos fisicoquímicos y espectroscópicos realizados.

Los parámetros considerados incluyen la viscosidad cinemática, el número ácido total (TAN), el número base total (TBN), los índices de oxidación y nitración determinados por FTIR, así como el contenido de agua medido mediante titulación coulométrica Karl Fischer. Dichos parámetros se utilizan ampliamente en el diagnóstico del estado de los lubricantes hidráulicos, ya que permiten identificar procesos de degradación, contaminación o pérdida de propiedades funcionales.

6. CAPITULO III: ANALIZAR EL NIVEL DE CONTAMINACIÓN POR PARTÍCULAS SÓLIDAS Y CONTENIDO DE AGUA EN LOS ACEITES HIDRÁULICOS, UTILIZANDO TÉCNICAS ESTABLECIDAS EN NORMAS ISO 4406, ASTM D630 Y ASTM D664, CON EL PROPÓSITO DE DETECTAR POSIBLES DETERIOROS O RIESGOS DE APLICACIÓN.

En este capítulo, se aborda el análisis de dos parámetros fundamentales para evaluar la calidad de los aceites hidráulicos utilizados en la flota de la EMAC-EP: la contaminación por partículas sólidas y el contenido de agua. Estos factores son cruciales para garantizar el rendimiento y la durabilidad de los sistemas hidráulicos, ya que la presencia excesiva de partículas o de agua puede provocar daños en los componentes del sistema, afectando su operación y eficiencia.

Para este análisis, se emplean técnicas normalizadas según las normas ISO 4406 para el conteo de partículas sólidas y ASTM D6304 para la determinación del contenido de agua. La contaminación por partículas se evalúa mediante el conteo de partículas en distintos rangos de tamaño, lo que permite determinar el nivel de limpieza del fluido hidráulico. Por otro lado, el contenido de agua se mide mediante la técnica de titulación de Karl Fischer, que ofrece una alta sensibilidad para detectar pequeñas concentraciones de agua en aceites hidráulicos.

6.1 Contaminación por partículas sólidas en aceites hidráulicos (ISO 4406)

6.1.1 Relevancia de la contaminación por partículas sólidas en la condición del aceite hidráulico

La contaminación por partículas sólidas es uno de los factores más críticos en la evaluación del estado de los aceites hidráulicos. La presencia de partículas en el fluido hidráulico puede provocar desgaste y daños en los componentes del sistema, como válvulas, bombas y actuadores. Además, el exceso de partículas puede alterar la capacidad de lubricación y aumentar la fricción, lo que conduce a un mayor desgaste de los componentes.

El análisis de partículas se realiza mediante el código de limpieza ISO 4406, que clasifica el fluido hidráulico según la cantidad de partículas presentes en tres rangos de tamaño: 4 μm , 6 μm

y 14 μm . La medición precisa de estas partículas es fundamental para determinar el riesgo de fallas en los componentes y evaluar el estado del fluido.

6.1.2 Principio del conteo de partículas según ISO 4406

El método de conteo de partículas ISO 4406 se realiza mediante tecnologías ópticas y láser que permiten clasificar las partículas según su tamaño. El código ISO 4406 se expresa en un formato de tres dígitos, donde:

La contaminación por partículas sólidas clasificando el fluido según el número de partículas presentes por mililitro, con base en tres rangos de tamaño:

Primer dígito: Partículas mayores o iguales a 4 μm .

Segundo dígito: Partículas mayores o iguales a 6 μm .

Tercer dígito: Partículas mayores o iguales a 14 μm .

Este código de tres dígitos proporciona una descripción más precisa de la limpieza del aceite y del nivel de contaminación por partículas, lo cual es crítico para evaluar el riesgo de desgaste y fallas en componentes hidráulicos sensibles, como válvulas, bombas y actuadores.

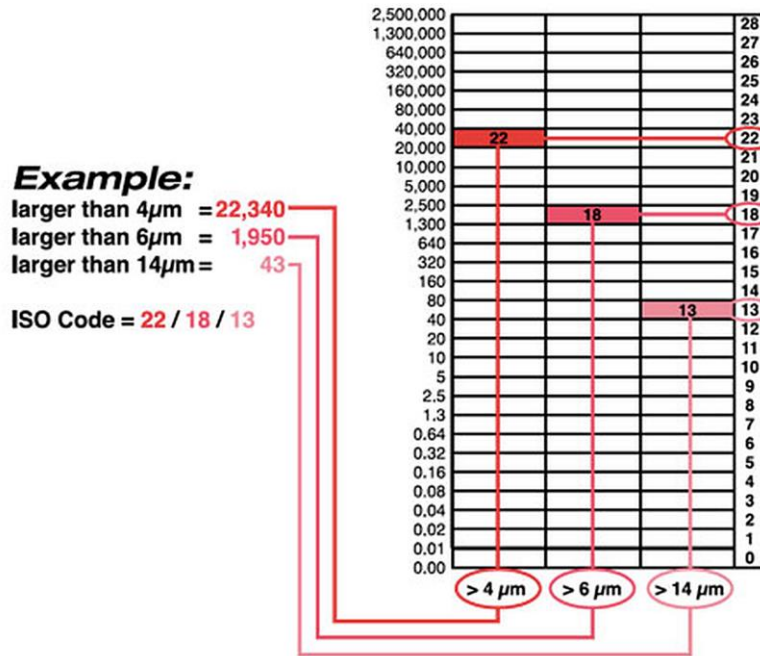
El código, por ejemplo, 18/16/13 significa lo siguiente:

- **18:** Indica que hay entre 1300 y 2500 partículas por ml, mayores o iguales a 4 μm .
- **16:** Indica que hay entre 160 y 320 partículas por ml, mayores o iguales a 6 μm .
- **13:** Indica que hay entre 40 y 80 partículas por ml, mayores o iguales a 14 μm .

Con base en este principio de clasificación, en la Figura 12 se presentan los valores de conteo de partículas obtenidos para las muestras de aceite hidráulico analizadas, así como el código ISO 4406 correspondiente, los cuales permiten evaluar el nivel de limpieza del fluido y su posible impacto en la operación del sistema hidráulico.

Figura 12

Ejemplo de interpretación del código ISO 4406.



Nota. Adaptado de *Understanding ISO 4406* en *Mobile Hydraulic Tips* (2020),

<https://www.mobilehydraulictips.com/understanding-iso-4406/>

6.1.3 Criterios Normativos y Límites de Contaminación por Partículas

Según la norma ISO 4406, el nivel de contaminación por partículas sólidas en aceites hidráulicos debe evaluarse según el tipo de sistema, la presión de operación y la sensibilidad de los componentes hidráulicos. Para sistemas de **maquinaria general y aplicaciones móviles de presión media**, se recomienda mantener códigos de limpieza en rangos moderados que permitan un equilibrio entre el desempeño y la protección de los componentes. En este contexto, un código de limpieza **19/17/14** es considerado adecuado para sistemas con tolerancias medias, ya que reduce el riesgo de desgaste abrasivo en elementos críticos como bombas, válvulas y actuadores, sin requerir niveles de limpieza excesivamente estrictos. Este criterio es ampliamente utilizado como referencia técnica en la industria para la gestión de contaminación en sistemas hidráulicos (Parker Hannifin Corporation, 2011).

En la Tabla 9 se observan los límites según los códigos 19/17/14 de la norma ISO 4406.

Tabla 9

Límites de referencia y rangos de contaminación por 1 ml, según el código ISO 4406:19/17/14, para sistemas de sensibilidad importante.

Tamaño de Partícula	Código ISO	Rango máximo de partículas por 1 ml
$\geq 4 \mu\text{m}$	19	2500 - 5000
$\geq 6 \mu\text{m}$	17	640 - 1300
$\geq 14 \mu\text{m}$	14	80 - 160

Nota. Adaptado de Guide to Contamination Standards, (Parker, 2021)

Los valores dentro de los rangos establecidos confirman que el aceite es apto para la operación. Si se superan estos límites, el fluido representa un riesgo para los componentes, por lo que se recomienda su reemplazo para evitar desgastes prematuros.

6.1.4 Análisis de muestras

A continuación, se presenta la Tabla 10 de resultados del conteo de partículas obtenidos en varias muestras de aceite hidráulico de la flota EMAC-EP.

Tabla 10

Resultados del conteo de partículas en las muestras de aceite hidráulico.

Muestra	4 μm	6 μm	14 μm	Código ISO 4406
EMAC_ISO68_U_AMA-531	640,3	10,7	0	17/11/0
EMAC_ISO68_U_AMA-1092	138,4	1,8	0,1	14/8/4
EMAC_ISO68_U_AMA-1093	61,5	1,1	0	13/7/0
EMAC_ISO68_U_AMA-851	2060,7	10,6	0,2	18/11/5

EMAC_ISO68_U_AMA-334	248,4	1,9	0	15/8/0
EMAC_ISO68_U_AMA-0526	1417	233,9	12,1	18/15/11
EMAC_ISO68_U_AMA-1345	137,8	2,5	0,1	14/8/4
EMAC_ISO68_U_AMA-1095	200,4	2,3	0,1	15/8/4
EMAC_ISO68_N_TQ01	175,4	10,4	0	15/11/0
EMAC_ISO68_N_MG01	410,2	9,5	0,1	16/10/4
ISO_68_EMAC_LB_N	32,3	1,6	0	12/8/0
ISO_68_EMAC_LB	26,8	1,2	0	12/7/0

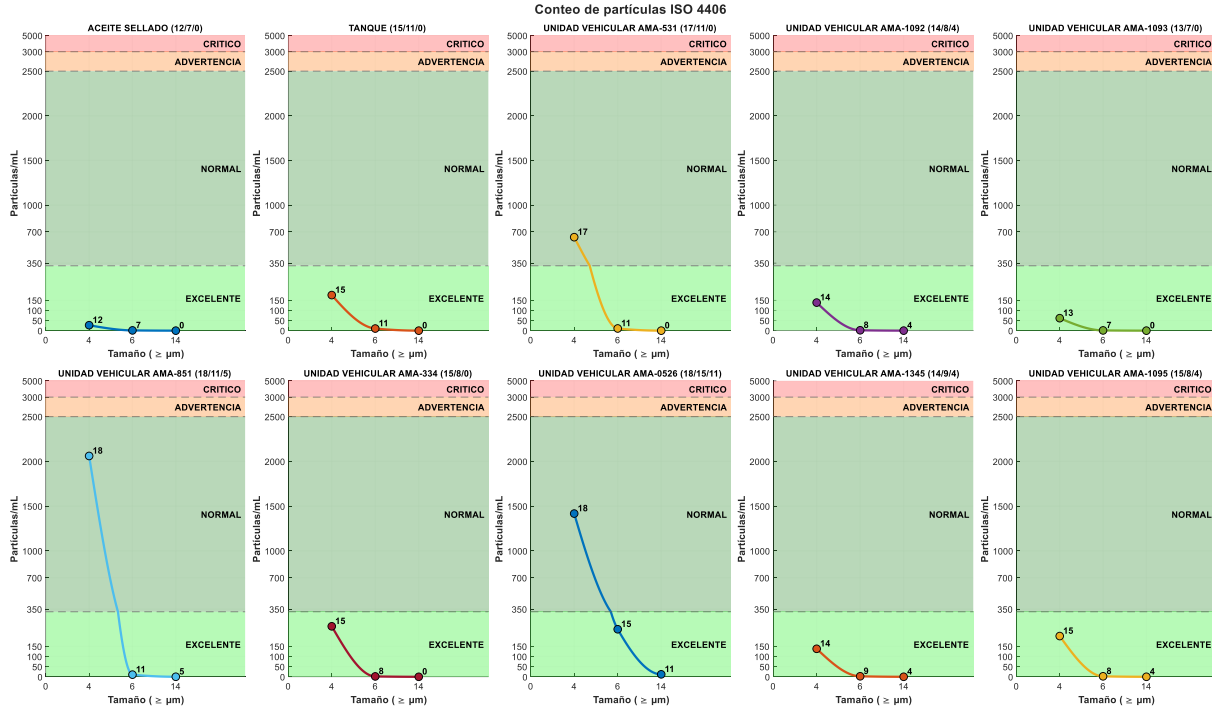
Nota. Elaboración propia.

Con el fin de complementar el análisis tabular presentado en la Tabla 10, se desarrolló una representación gráfica del conteo de partículas sólidas mediante herramientas de programación en MATLAB, que permite visualizar de manera comparativa el comportamiento del nivel de contaminación del aceite hidráulico en las diferentes muestras analizadas. Esta representación gráfica facilita la interpretación de las variaciones en el número de partículas en cada rango de tamaño considerado por la norma ISO 4406 ($\geq 4 \mu\text{m}$, $\geq 6 \mu\text{m}$ y $\geq 14 \mu\text{m}$), así como la comparación directa entre aceites nuevos, aceites usados y la muestra de línea base.

La Figura 13 muestra la representación gráfica del conteo de partículas sólidas desarrollada en MATLAB.

Figura 13

Representación gráfica del conteo de partículas sólidas en aceites hidráulicos conforme a la norma ISO 4406.



Nota. Elaboración propia

La gráfica permite identificar tendencias de incremento o disminución del nivel de limpieza del fluido, evidenciando el impacto del uso, la manipulación y las condiciones de almacenamiento en la contaminación por partículas sólidas. Asimismo, la visualización conjunta de los tres rangos de tamaño contribuye a una evaluación más clara del riesgo potencial de desgaste abrasivo en los componentes hidráulicos, complementando los resultados numéricos obtenidos mediante el conteo de partículas y el código ISO 4406 asignado a cada muestra.

6.2 Determinación del contenido de agua en aceites hidráulicos mediante el método Karl Fischer

El contenido de agua es uno de los parámetros más críticos para evaluar el estado de los aceites hidráulicos, debido a su impacto directo en la estabilidad química del lubricante y en la confiabilidad del sistema hidráulico. La presencia de humedad favorece procesos de oxidación del aceite base, hidrólisis y desactivación de aditivos, formación de emulsiones y lodos, así como fenómenos de corrosión en las superficies metálicas internas. Estos mecanismos conducen a una reducción progresiva de la capacidad lubricante, a una disminución de la eficiencia volumétrica y a un aumento del desgaste en componentes críticos como bombas, válvulas y actuadores.

En sistemas hidráulicos industriales y móviles, el ingreso de agua se asocia principalmente a la condensación por variaciones térmicas, la absorción de humedad ambiental, fallas en sellos y respiraderos, y a prácticas inadecuadas durante el almacenamiento, transporte o manipulación del lubricante. Incluso concentraciones relativamente bajas de agua pueden acelerar la degradación del fluido y comprometer la confiabilidad operativa del sistema, lo que justifica su monitoreo sistemático.

La determinación del contenido de agua se realiza mediante el método de Karl Fischer, basado en una reacción química específica, cuantitativa y altamente selectiva entre el agua y un sistema reactivo que contiene yodo, dióxido de azufre, una base orgánica y un solvente alcohólico. La naturaleza estequiométrica de la reacción permite establecer una relación directa entre el consumo del reactivo y la cantidad de agua presente en la muestra, garantizando alta exactitud y repetibilidad. Su elevada sensibilidad, en el rango de partes por millón (ppm), lo convierte en el método de referencia para el análisis de la humedad en aceites hidráulicos.

La aplicación del método se rige por la norma ASTM D6304, que establece los lineamientos técnicos para la titulación Karl Fischer, tanto volumétrica como coulométrica, siendo esta última especialmente adecuada para la medición de bajas concentraciones de agua. Aunque la norma no define límites absolutos de aceptación, los resultados se interpretan a partir de rangos técnicos y tribológicos utilizados en la industria, lo que permite evaluar el estado del lubricante, identificar condiciones anómalas de operación y respaldar decisiones de mantenimiento predictivo basadas en criterios objetivos y confiables.

A continuación, en la Tabla 11, se presentan los rangos referenciales de contenido de agua para distintos tipos de aceites lubricantes, junto con su interpretación tribológica correspondiente, de acuerdo con criterios técnicos y prácticas comúnmente aceptadas en la industria. Estos rangos permiten contextualizar los resultados obtenidos mediante el método de Karl Fischer y facilitan la evaluación del estado del lubricante en función del nivel de humedad.

Tabla 11

Límites referenciales de contenido de agua e interpretación tribológica por tipo de lubricante.

Tipo de Aceite	Rango Típico de Contenido de Agua (ppm)	Interpretación Tribológica
Aceite de motor	0 – 500 ppm	Valores elevados indican condensación, contaminación por refrigerante o degradación del lubricante
Aceite hidráulico	0 – 300 ppm	La presencia de agua favorece cavitación, corrosión y pérdida de eficiencia del sistema
Aceite ATF (Transmisión Automática)	0 – 200 ppm	El agua afecta la fricción controlada y puede provocar fallas en la transmisión automática
Aceite de transmisión	0 – 300 ppm	El exceso de humedad acelera la oxidación y el desgaste de engranajes

Nota. Los rangos típicos representan los límites de advertencia operativa para lubricantes en servicio. Adaptado de *Fuels and Lubricants Handbook* por Totten, Westbrook & Shah (2017) y las guías de *Machinery Lubrication* de Noria Corporation.

6.2.1 Resultados del análisis de contenido de agua por Karl Fischer

Una vez establecidos los criterios técnicos de referencia, se procedió a determinar experimentalmente el contenido de agua en las muestras de aceite hidráulico mediante el método de Karl Fischer. Los resultados finales del análisis, expresados en partes por millón (ppm) y porcentaje (%), se presentan en la Tabla 12, lo que permite una comparación directa entre el aceite nuevo sellado y los aceites expuestos a condiciones reales de almacenamiento y manipulación.

Tabla 12

Resultados del contenido de agua en aceites hidráulicos mediante el método de Karl Fischer.

Tipo de muestra	Water (ppm)	Agua (%)
Aceite nuevo sellado	-8.5	0
Aceite de manguera	57.7	0.006
Aceite de tanque	23.0	0.002

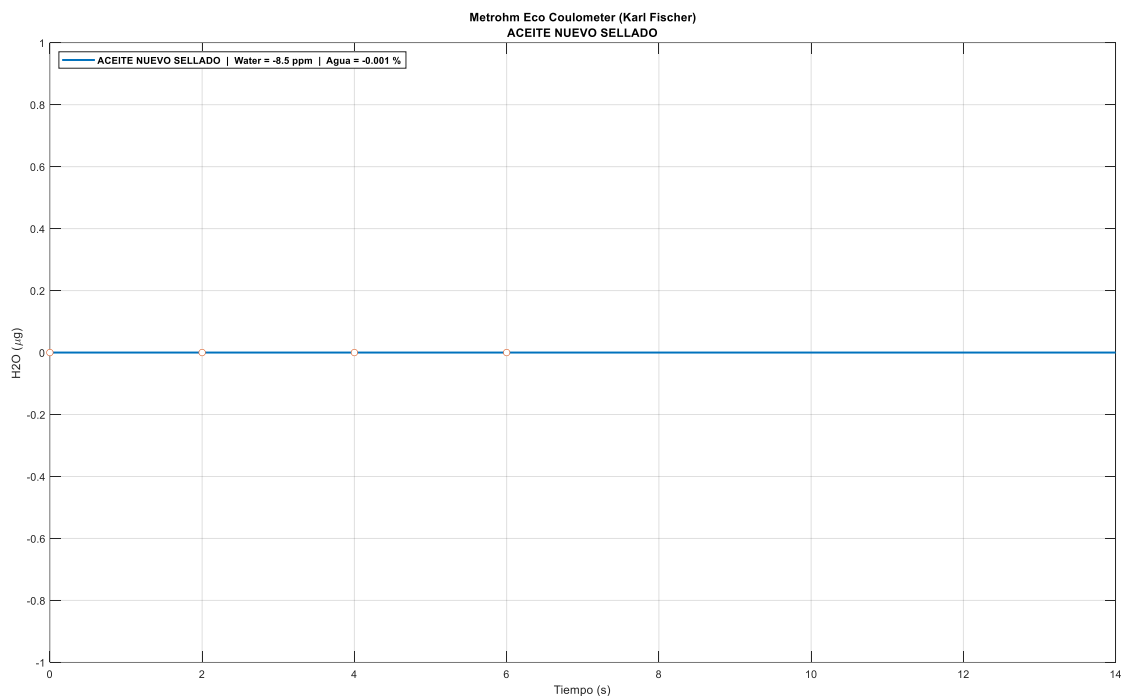
Nota. Elaboración propia

Con el fin de complementar los resultados numéricos obtenidos y analizar el comportamiento del proceso de titulación, en las Figuras 14, 15 y 16 se muestran las curvas de H_2O vs. *tiempo* correspondientes a las tres muestras evaluadas. Estas gráficas, desarrolladas con herramientas de programación en MATLAB, permiten visualizar la cinética de liberación del agua durante el ensayo de Karl Fischer y respaldar la confiabilidad de los valores finales reportados.

La Figura 14 muestra la curva de H_2O vs *tiempo* correspondiente al aceite nuevo sellado, evidenciando un comportamiento prácticamente horizontal durante todo el intervalo de medición. Este comportamiento indica la ausencia de liberación significativa de agua durante el proceso de titulación, lo que confirma un contenido de humedad prácticamente nulo en la muestra.

Figura 14

Curvas H_2O vs tiempo obtenidas mediante el método Karl Fischer para el aceite nuevo sellado.



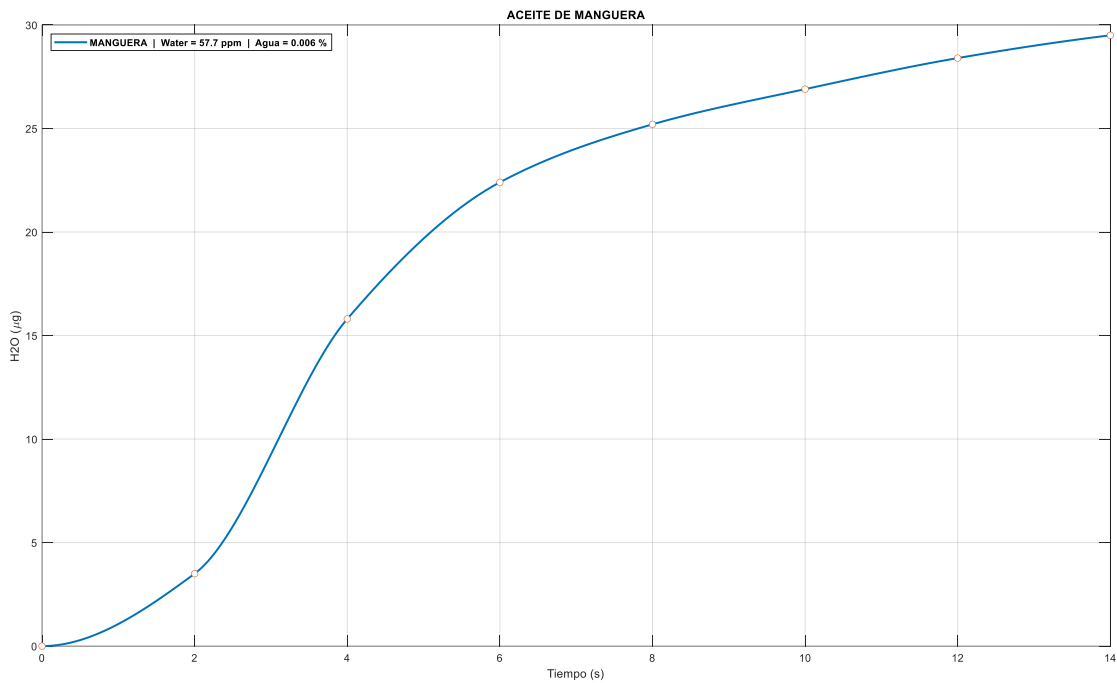
Nota. Elaboración propia

El resultado obtenido es coherente con los valores reportados en la Tabla 12, donde el contenido de agua del aceite nuevo sellado se encuentra por debajo del límite de detección del equipo. Esta condición confirma que el lubricante mantiene su estado original, sin contaminación por humedad, lo que valida su uso como referencia para el establecimiento de la línea base del contenido de agua en el sistema hidráulico.

La Figura 15 presenta la curva H₂O vs tiempo correspondiente al aceite de manguera, donde se observa un incremento progresivo del contenido de agua a lo largo del tiempo de titulación. Este comportamiento refleja una mayor presencia de humedad en comparación con el aceite nuevo sellado, atribuible a la exposición al ambiente y a las condiciones de manipulación y almacenamiento del lubricante.

Figura 15

Curva H_2O vs tiempo obtenida mediante el método Karl Fischer para el aceite de manguera.

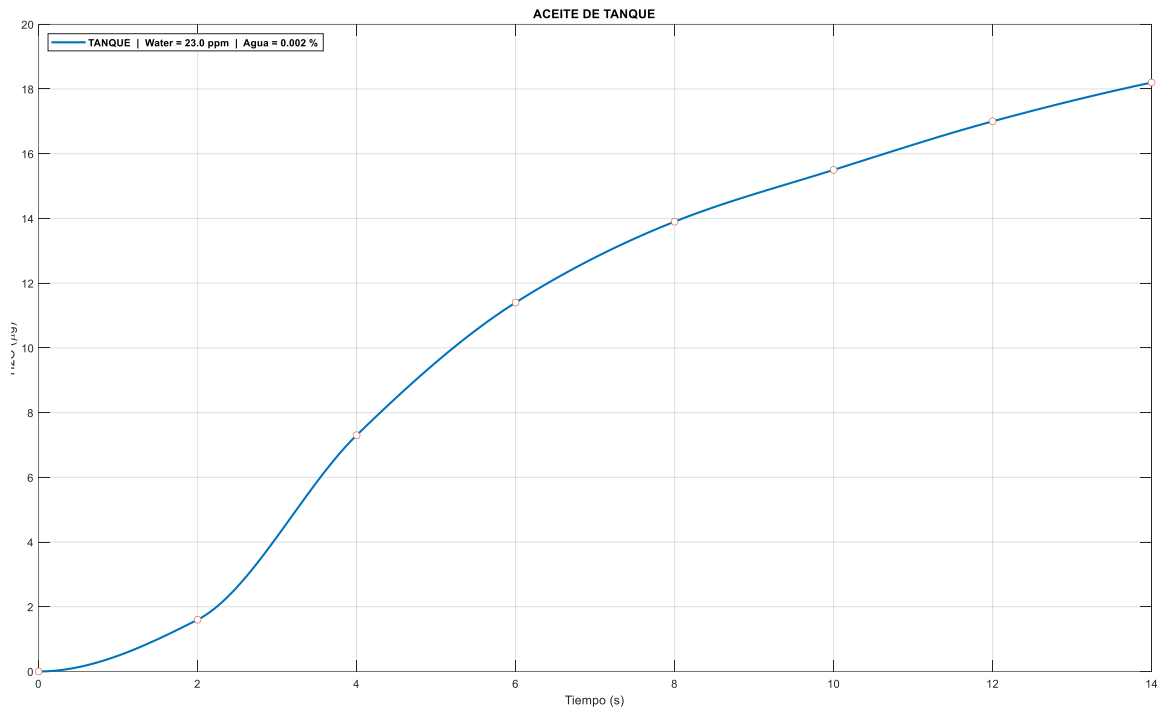


Nota. Elaboración propia.

Por su parte, la Figura 16 corresponde al aceite de tanque, mostrando un incremento gradual del contenido de agua durante el ensayo, con valores intermedios entre el aceite nuevo sellado y el aceite de manguera. Este comportamiento es consistente con una exposición moderada a condiciones ambientales durante el almacenamiento previo al uso operativo.

Figura 16

Curva H_2O vs tiempo obtenida mediante el método Karl Fischer para el aceite de tanque.



Nota. Elaboración propia.

El análisis conjunto de los resultados evidencia un contenido de agua prácticamente nulo en el aceite nuevo sellado, confirmando su condición inicial óptima antes del uso operativo. En contraste, las muestras de aceite provenientes de manguera y tanque presentan incrementos progresivos en el contenido de agua; sin embargo, los valores obtenidos se mantienen dentro de los rangos típicos reportados para aceites hidráulicos en servicio, sin evidenciar condiciones críticas de contaminación por humedad. Estos resultados permiten evaluar el estado del lubricante y constituyen una base técnica confiable para el establecimiento de la línea base del contenido de agua en el sistema hidráulico de la flota EMAC-EP.

7. CAPITULO IV: ESTABLECER PARÁMETROS DE REFERENCIA TÉCNICOS A PARTIR DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS, MEDIANTE COMPARACIÓN CON ESPECIFICACIONES DEL FABRICANTE Y LITERATURA ESPECIALIZADA, PARA CONSTRUIR UNA LÍNEA BASE DE EVALUACIÓN DE ACEITES HIDRÁULICOS EN ALMACENAMIENTO.

El análisis de aceites hidráulicos en almacenamiento es un proceso clave para garantizar el correcto funcionamiento y la durabilidad de los equipos hidráulicos, especialmente en contextos industriales como el de la flota de la EMAC-EP. En este capítulo se establece un marco de referencia técnico basado en los resultados obtenidos mediante las pruebas realizadas, que incluyen el análisis por FTIR (espectroscopía de infrarrojo por transformada de Fourier), el método de Karl Fischer para la determinación de agua y el conteo de partículas sólidas. Estos análisis permiten evaluar la calidad y el estado de los aceites hidráulicos a lo largo del tiempo e identificar posibles indicios de deterioro o contaminación.

La espectroscopía FTIR es una herramienta potente para identificar la presencia de aditivos, contaminantes y productos de oxidación en los aceites. Mediante la titulación de Karl Fischer, se determina la cantidad de agua en el aceite, un parámetro crítico para evitar la corrosión y el deterioro de las partes metálicas del sistema hidráulico. Finalmente, el conteo de partículas, basado en la norma ISO 4406, ofrece una visión detallada del nivel de contaminación por partículas sólidas, lo cual es fundamental para evaluar el riesgo de fallos en los componentes hidráulicos.

En base a los resultados obtenidos de estas pruebas, se comparan los valores con las especificaciones del fabricante y con la literatura especializada, con el objetivo de establecer una línea base de referencia para la evaluación continua de los aceites en almacenamiento. Esta línea base servirá no solo para monitorear el estado de los aceites, sino también para detectar cualquier anomalía en su calidad que pueda comprometer la eficiencia y la seguridad de los equipos de la flota.

A través de este análisis comparativo, se busca proporcionar un sistema de control que permita gestionar eficientemente el mantenimiento de los aceites hidráulicos, asegurando su integridad y optimizando el rendimiento de los sistemas hidráulicos de la EMAC-EP.

7.1 Resultados analizados

En este apartado se presentan los resultados obtenidos a partir de los análisis realizados en diferentes tipos de muestras de aceite: aceite nuevo sellado, aceite nuevo abierto, aceite usado de máquinas y aceites con contenido de agua en porcentajes específicos. Cada conjunto de muestras fue analizado mediante diversas técnicas especializadas para evaluar los cambios en los parámetros físicos y químicos de los aceites. Para los análisis de oxidación, nitración, viscosidad y TAN, se utilizó la espectroscopía FTIR (Espectroscopía de Infrarrojo por Transformada de Fourier), mientras que el conteo de partículas se realizó conforme a la norma ISO 4406. El análisis de contenido de agua se efectuó exclusivamente en las muestras de aceite nuevo usado en EMAC-EP mediante el método de Karl Fischer, dado que se consideró que este aceite reflejaba las condiciones más controladas y representativas para estudiar la influencia de la humedad en las propiedades del aceite.

7.1.1 Tipos de muestras analizadas

- **Aceite Nuevo Sellado:** Este aceite representa el estado óptimo del lubricante, sin contaminación ni degradación, lo que lo convierte en una línea base ideal para comparar las características de los aceites en condiciones controladas. El análisis mediante FTIR se realizó para establecer una línea de base de la composición química del aceite, lo que permitió evaluar la presencia de aditivos y posibles contaminantes. Además, este aceite fue medido por su contenido de agua mediante el método de Karl Fischer, ya que, al ser un aceite nuevo sellado, refleja las condiciones originales del fluido, sin alteraciones por humedad o contaminación, lo cual resulta esencial para establecer referencias precisas. De igual manera, el conteo de partículas, también realizado en esta muestra, permitió establecer un valor de contaminación inicial del aceite en su estado óptimo, que sirvió de referencia para comparar con aceites usados o abiertos que podrían haber experimentado variaciones en la calidad debido a factores ambientales o de operación.
- **Aceite Nuevo Abierto:** Este aceite ha estado expuesto al ambiente, lo que puede provocar una ligera contaminación por humedad o oxígeno, factores que podrían

afectar sus propiedades. Para evaluar cómo la exposición ambiental ha influido en la composición del aceite, se realizó un análisis FTIR, lo que permitió identificar posibles cambios en los aditivos y en la química del aceite. Además, se llevó a cabo el análisis de contenido de agua mediante el método de Karl Fischer, dado que la exposición al ambiente podría haber permitido la absorción de humedad, lo cual es crucial para evaluar cómo la presencia de agua altera las propiedades del aceite. También se realizó el conteo de partículas, ya que la exposición al aire y el almacenamiento podrían haber permitido la contaminación por partículas sólidas, lo que es importante para comparar el nivel de limpieza del aceite abierto frente al aceite sellado, que se toma como referencia.

- **Aceite Usado de Máquinas:** Este aceite proviene de equipos en operación, lo que implica la presencia de contaminantes sólidos, agua y productos de oxidación generados durante su uso. Dado que este aceite ya no constituye una línea base como el aceite nuevo sellado, el análisis mediante FTIR se centró en evaluar los cambios en la composición química del aceite a lo largo de su vida útil, especialmente en lo que respecta a los procesos de oxidación y nitración, indicativos del desgaste y la degradación del aceite con el tiempo. Además, se realizó el conteo de partículas para cuantificar la contaminación sólida presente en el aceite, lo cual es crucial para evaluar el impacto de dichos contaminantes en el rendimiento y la vida útil de los componentes del sistema hidráulico. En este caso, no se realizó el análisis de contenido de agua, ya que el enfoque principal estaba en evaluar la degradación química y el efecto de los contaminantes generados durante el uso del aceite, más que en el análisis de la humedad, dado que la exposición al aire ya implica cierta cantidad de agua en el aceite.
- **Aceites con Diferentes Porcentajes de Agua:** Además de los aceites previamente mencionados, se analizaron muestras de aceite con contenido de agua controlado en laboratorio (en varios porcentajes) para estudiar cómo la presencia de agua afecta las características del aceite, en particular la oxidación y el desgaste de aditivos. Sin embargo, solo se utilizó el análisis FTIR para evaluar la oxidación y los efectos de la humedad sobre la química del aceite. En este caso, no se realizó el

análisis de contenido de agua utilizando el método Karl Fischer, ni el conteo de partículas, ya que estas muestras de aceite fueron selladas y únicamente se les añadió agua en porcentajes controlados, sin exposición a contaminantes o factores externos que puedan alterar significativamente el aceite. El análisis con FTIR permitió observar los cambios en la composición química del aceite en presencia de agua, sin la interferencia de otros contaminantes que podrían afectar los resultados en aceites usados o abiertos.

7.2. Resultados

En esta sección se presentan los análisis FTIR, Karl Fisher y el conteo de partículas del aceite hidráulico utilizado en la flota EMAC-EP. Se analizaron muestras, incluyendo aceite nuevo sellado, aceite nuevo EMAC, aceite usado. Los parámetros evaluados incluyen la viscosidad a 40 y 100 °C, la nitración, la oxidación y el TAN.

7.2.1 Aceite nuevo sellado

El aceite nuevo sellado representa la condición inicial del lubricante, al no haber estado expuesto a factores ambientales ni a condiciones de operación. Permitiendo establecer valores de referencia para la evaluación comparativa de los demás tipos de muestras analizadas, los cuales permiten caracterizar su estado fisicoquímico inicial y definir los parámetros base del sistema hidráulico.

7.2.1.1 Resultados del Análisis de FTIR para aceite nuevo sellado línea base

En esta sección se presentan los resultados obtenidos mediante el análisis FTIR (espectroscopía de infrarrojo por transformada de Fourier) del aceite ISO 68 nuevo sellado y del aceite hidráulico, utilizados en la flota de EMAC-EP. El objetivo de este análisis es evaluar las alteraciones en la composición química de los aceites, identificando posibles procesos de oxidación, nitración y otros factores relacionados con el envejecimiento y desgaste del lubricante. La tabla 13, recoge los valores obtenidos para cada parámetro para el aceite de línea base.

Tabla 13

Resultados de FTIR en las muestras de aceite hidráulico.

Muestra	Viscosidad a 40 °C (cSt)	Viscosidad a 100 °C (cSt)	Nitración (Abs/0,1 mm)	Oxidación (Abs/0,1 mm)	Sulfatos (Abs/0,1 mm)	TAN (mg KOH/g)
ISO_68_EMA C_LB	62.3	6.7	0.027431	0.012473	0.19308	0.0
EMAC_ISO_6 8_N_TQ01	109.7	12.4	0.041641	0.038720	0.19521	1.3
EMAC_ISO_6 8_N_MG01	113.3	12.5	0.055182	0.052765	0.19785	1.3

Nota. Elaboración propia.

La muestra de línea base presenta una viscosidad a 40 °C dentro del rango establecido para un aceite ISO VG 68 (61–78 cSt), junto con índices de nitración, oxidación y sulfatación inferiores al valor de referencia de 0,2 Abs/0,1 mm y un TAN igual a cero, lo que confirma su condición estable y la ausencia de degradación química significativa.

Se observa también, que la muestra del tanque tiene un incremento de la viscosidad y de los índices FTIR de nitración, oxidación y sulfatación, así como un aumento del TAN respecto al aceite nuevo sellado, lo que indica el inicio de procesos de envejecimiento del aceite asociados a la oxidación del aceite base y a la degradación progresiva de los aditivos.

Asimismo, la muestra de manguera presenta los valores más elevados de viscosidad, índices de degradación y TAN, lo que evidencia una etapa más avanzada del proceso de degradación química debido a una mayor exposición a las condiciones operativas y de circulación. No obstante, pese a estos incrementos, los valores registrados no superan los límites críticos establecidos para aceites hidráulicos, por lo que el lubricante mantiene su condición funcional.

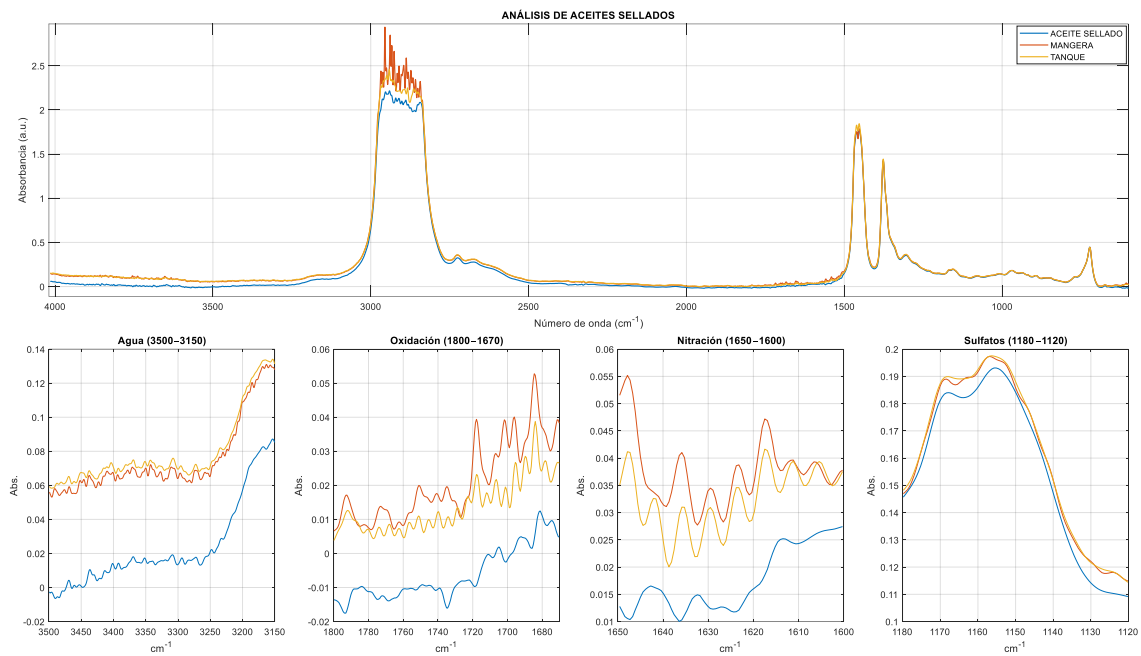
En conjunto, los resultados evidencian una tendencia progresiva de degradación desde la línea base hacia el tanque y la manguera, lo que refleja modificaciones graduales en las propiedades fisicoquímicas del aceite sin alcanzar un estado de degradación severa.

Con el fin de complementar el análisis cuantitativo presentado en la Tabla 13 de resultados fisicoquímicos, la Figura 17 muestra el análisis espectral de las muestras correspondientes al aceite

sellado: aceite nuevo, tanque y manguera. Este análisis permite evaluar las alteraciones químicas del lubricante mediante la identificación de procesos de degradación, como la oxidación, la nitración y la sulfatación, que se manifiestan en regiones específicas del espectro infrarrojo.

Figura 17

Análisis comparativo de los aceites nuevos ISO 68 mediante FTIR.



Nota. Elaboración propia.

Los resultados obtenidos en el análisis tabular se corroboran mediante la gráfica FTIR, en la que se comparan los espectros de las tres muestras analizadas. En esta representación, la curva azul corresponde a la muestra de línea base, la naranja a la del tanque y la roja a la de la manguera.

La muestra de línea base presenta niveles de absorbancia bajos y estables en las regiones asociadas a la oxidación, la nitración y la sulfatación, lo que concuerda con los valores reducidos observados en la tabla y confirma su condición de aceite sin degradación química significativa. En la muestra del tanque, se evidencia un incremento moderado de la absorbancia en dichas regiones, consistente con el aumento de los índices FTIR y de la viscosidad registrados, lo que indica el inicio de procesos de envejecimiento del lubricante. Por su parte, la muestra de manguera presenta

los niveles más altos de absorbancia, lo que confirma una etapa más avanzada del proceso de degradación química, en concordancia con los valores más elevados de viscosidad, FTIR y TAN obtenidos en el análisis tabular.

No obstante, pese a las diferencias observadas entre las curvas, las variaciones espectrales no alcanzan niveles asociados a una degradación severa o crítica. En conjunto, tanto el análisis tabular como la representación gráfica FTIR evidencian una tendencia progresiva de degradación desde la línea base hacia el tanque y la manguera, sin comprometer aún la operatividad del sistema hidráulico, que integra diferentes métodos para un análisis integral.

7.2.1.2 Resultados del Análisis de conteo de partículas para aceite nuevo sellado

En esta sección se presentan los resultados obtenidos mediante el conteo de partículas del aceite nuevo sellado, así como del aceite utilizado en los sistemas hidráulicos de la flota de EMAC-EP. El objetivo de este análisis es evaluar el nivel de contaminación por partículas sólidas en el aceite, lo cual es fundamental para garantizar la calidad del lubricante y la protección de los componentes hidráulicos. La norma ISO 4406 se aplicó para clasificar el aceite según el número de partículas de distintos tamaños presentes en el fluido, cuyo resultado se recoge en la Tabla 14.

Tabla 14

Resultados del conteo de partículas en las muestras de aceite hidráulico.

Muestra	4 μm	6 μm	14 μm	Código ISO 4406
ISO_68_EMAC_LB	26,8	1,2	0	12/7/0
EMAC_ISO68_N_TQ01	175,4	10,4	0	15/11/0
EMAC_ISO68_N_MG01	410,2	9,5	0,1	16/10/4

Nota. Elaboración propia.

Los resultados del conteo de partículas sólidas muestran una evolución progresiva del nivel de contaminación del aceite hidráulico desde la muestra de línea base (ISO_68_EMAC_LB) hacia las muestras obtenidas del tanque (EMAC_ISO68_N_TQ01) y de la manguera (EMAC_ISO68_N_MG01). Esta tendencia es coherente con el grado de exposición del lubricante

a las condiciones reales de almacenamiento, manipulación y circulación dentro del sistema hidráulico.

La muestra de línea base de aceite nuevo sellado presenta los valores más bajos de partículas en los rangos evaluados (4 μm , 6 μm y 14 μm), con un código ISO 4406 de 12/7/0, lo que refleja un estado de limpieza favorable y confirma su condición inicial adecuada como referencia del sistema. La ausencia de partículas significativas en el rango de 14 μm sugiere un bajo riesgo de desgaste abrasivo en los elementos sensibles del sistema en esta condición de referencia.

En la muestra proveniente del tanque se observa un incremento marcado en el conteo de partículas, principalmente en los rangos de 4 μm y 6 μm , lo que corresponde a un código ISO 4406 de 15/11/0. Este comportamiento evidencia una contaminación inicial asociada al almacenamiento y a las primeras interacciones del aceite con el sistema (superficies internas, manipulación y posibles contaminantes ambientales). No obstante, el valor en 14 μm se mantiene nulo, lo que indica que, aunque existe un aumento de partículas finas, aún no se evidencia una presencia relevante de partículas grandes, que suelen estar más directamente asociadas al desgaste severo o a la falla acelerada.

Por su parte, la muestra de manguera presenta el mayor nivel de contaminación por partículas sólidas, con incrementos en los tres rangos evaluados y un código ISO 4406 de 16/10/4. Este resultado sugiere una condición del sistema de provisión en la que la circulación del lubricante favorece la incorporación y acumulación de contaminantes. La aparición de partículas en el rango $\geq 14 \mu\text{m}$, aunque en baja magnitud, representa un indicio de mayor riesgo relativo frente a las otras muestras, debido a que este tamaño de partícula está más asociado a daño abrasivo en componentes críticos como bombas, válvulas y actuadores.

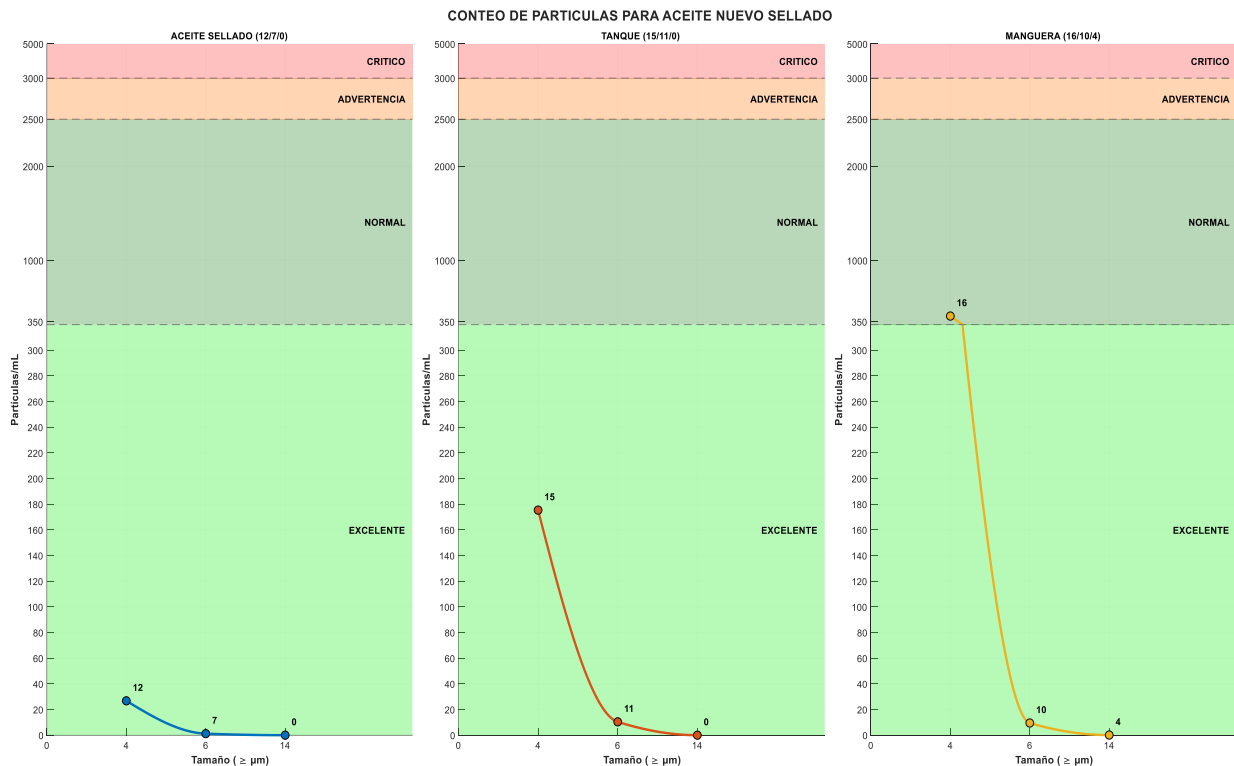
En conjunto, los resultados confirman una tendencia progresiva de contaminación desde la línea base hacia el tanque y, posteriormente, hacia la manguera. Sin embargo, pese al aumento de partículas reportado bajo la ISO 4406, los valores observados se mantienen dentro de un comportamiento operativo controlado para el sistema, lo que evidencia una condición de deterioro incipiente y no una contaminación crítica inmediata. Esta comparación permite establecer una línea de evaluación técnica del lubricante y sustenta la necesidad de un monitoreo continuo para

prevenir que el nivel de contaminación alcance rangos que comprometan la confiabilidad del sistema hidráulico.

Con el fin de complementar el análisis cuantitativo presentado en la Tabla 14, la Figura 18 permite visualizar de forma comparativa la variación del nivel de limpieza del aceite según los rangos de tamaño establecidos por ISO 4406 ($\geq 4 \mu\text{m}$, $\geq 6 \mu\text{m}$ y $\geq 14 \mu\text{m}$). Esta representación facilita corroborar la tendencia de incremento progresivo de contaminación desde la muestra de línea base hacia las muestras del tanque y de la manguera, destacando el cambio relativo del riesgo asociado a la presencia de partículas finas y, especialmente, a la aparición de partículas de mayor tamaño, así como su ubicación relativa dentro de las zonas de excelente, normal, advertencia y crítica establecidas como referencia para la evaluación de limpieza del fluido (ISO 4406).

Figura 18

Análisis comparativo del conteo de partículas del aceite ISO 68 en aceites nuevos.



Nota. Elaboración propia.

En el caso de la muestra de línea base, los valores de conteo de partículas se concentran en la zona excelente para los tres rangos de tamaño evaluados, lo que confirma un alto nivel de limpieza del aceite y una condición inicial adecuada. Este comportamiento concuerda con el bajo código ISO 4406 obtenido y valida su uso como referencia del sistema hidráulico.

La muestra del tanque muestra un incremento en el conteo de partículas, principalmente en el rango $\geq 4 \mu\text{m}$, que se desplaza hacia la zona normal, mientras que los rangos $\geq 6 \mu\text{m}$ y $\geq 14 \mu\text{m}$ se mantienen en niveles bajos. Este comportamiento indica la incorporación inicial de partículas finas asociadas al almacenamiento y a las primeras interacciones con el sistema, sin evidenciar aún un riesgo elevado de desgaste por partículas de mayor tamaño.

Por su parte, la muestra de la manguera presenta los valores más altos de conteo de partículas, con un aumento notable en el rango $\geq 4 \mu\text{m}$ y la aparición de partículas en el rango $\geq 14 \mu\text{m}$, aunque estas se mantienen dentro de niveles controlados. La ubicación de esta muestra dentro de la zona normal, sin alcanzar las regiones de advertencia ni críticas, sugiere una mayor exposición del aceite a condiciones de operación y circulación, pero no evidencia una condición de contaminación severa.

En conjunto, el gráfico confirma una tendencia progresiva de aumento de la contaminación por partículas sólidas desde la línea base hasta el tanque y, posteriormente, hacia la manguera. No obstante, los resultados indican que el aceite aún opera dentro de rangos aceptables de limpieza, sin representar un riesgo inmediato para la integridad de los componentes hidráulicos, aunque sí evidencian la necesidad de un monitoreo continuo para prevenir una evolución hacia niveles críticos de contaminación.

7.2.1.3 Resultados del Análisis de Karl Fisher para aceite nuevo sellado

El objetivo principal de este análisis es determinar la cantidad de agua presente en el aceite, ya que la humedad es uno de los contaminantes más críticos que puede afectar las propiedades del lubricante y la integridad de los componentes hidráulicos.

El aceite nuevo sellado, al encontrarse en su estado óptimo y sin exposición a factores ambientales, proporciona una línea base confiable para evaluar el contenido de agua en aceites hidráulicos. Este análisis es crucial, ya que la presencia de agua, incluso en pequeñas cantidades,

puede provocar oxidación, corrosión y una disminución de la eficacia de los aditivos, lo que afecta negativamente el rendimiento del sistema hidráulico.

La Tabla 15 muestra los valores obtenidos para el contenido de agua en el aceite nuevo sellado, sirviendo como referencia para futuras comparaciones con aceites abiertos o usados, que pueden haber sufrido alteraciones debido a la exposición a la humedad o a la contaminación.

Tabla 15

Resultados de Karl Fisher en las muestras de aceite hidráulico.

Muestra	Agua (ppm)	Agua (%)
ISO_68_EMAC_LB	0,0	0.00
EMAC_ISO_68_TQ	23.0	0.002
EMAC_ISO_68_MG	57.7	0.006

Nota. Elaboración propia.

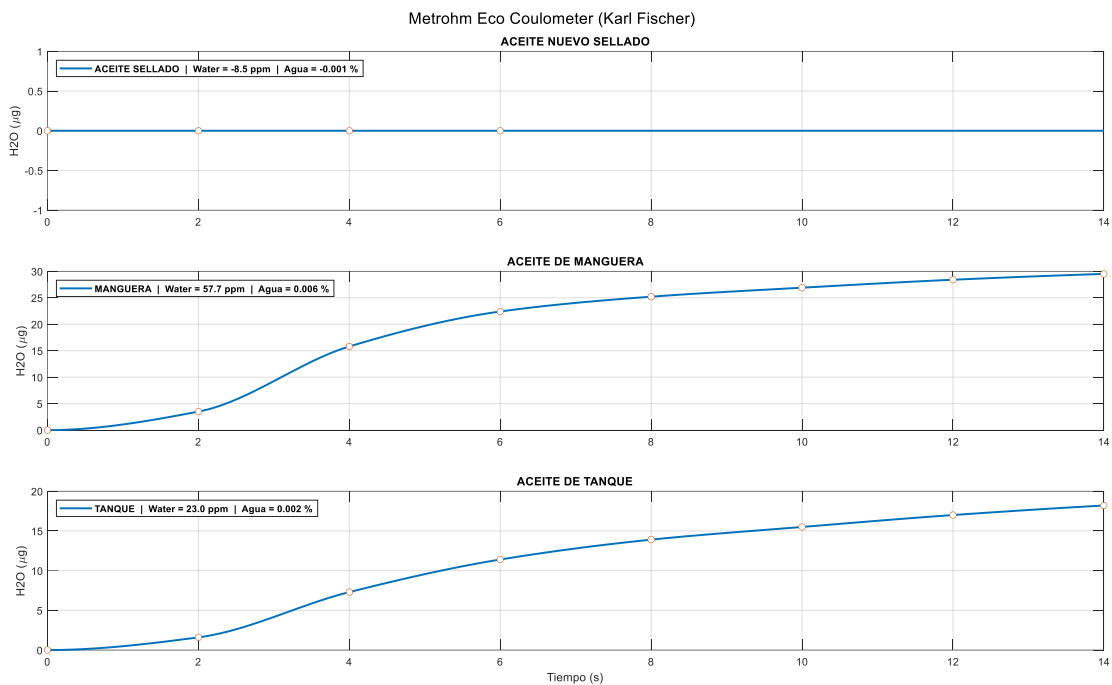
Los resultados del análisis de contenido de agua mediante el método de Karl Fischer indican que las muestras de aceite hidráulico presentan niveles de humedad bajos, sin superar el umbral crítico de 300 ppm, establecido como condición de riesgo para el sistema. La muestra correspondiente al aceite de línea base presenta un contenido de agua prácticamente nulo, por debajo del límite de detección del equipo. Por su parte, las muestras provenientes del tanque y de la manguera evidencian incrementos progresivos en el contenido de agua; sin embargo, estos valores se mantienen dentro de rangos aceptables y no representan una condición crítica de contaminación por humedad. Los resultados obtenidos constituyen una referencia preliminar para el establecimiento posterior de la línea base del contenido de agua en el aceite hidráulico.

Con el fin de complementar el análisis cuantitativo del contenido de agua determinado mediante el método de Karl Fischer, a continuación, en la Figura 19 se presenta la evolución de la

humedad en función del tiempo de titulación para las muestras de aceite nuevo sellado, de tanque y de manguera. Esta representación permite visualizar de manera comparativa el comportamiento del contenido de agua en cada condición de muestreo, facilitando la interpretación del estado del lubricante y su relación con el grado de exposición del aceite dentro del sistema hidráulico.

Figura 19

Análisis comparativo de los aceites ISO 68.



Nota. Elaboración propia

La gráfica correspondiente a la muestra de aceite nuevo sellado muestra un comportamiento prácticamente lineal en cero durante todo el proceso de titulación, registrando un contenido de agua de 0 ppm ($\approx 0\%$). Este resultado confirma que el aceite se encuentra en una condición seca y estable, sin evidencia de contaminación por humedad, lo que valida su condición inicial y su uso como referencia del sistema.

En la muestra proveniente del tanque, se observa un incremento progresivo del contenido de agua durante la titulación, alcanzando un valor final de 23,0 ppm ($\approx 0,002\%$). Este

comportamiento indica la presencia de una cantidad moderada de humedad en el aceite, atribuible principalmente a factores como la condensación, la exposición al ambiente y el almacenamiento. No obstante, el contenido de agua registrado se mantiene dentro de rangos bajos, sin evidenciar una condición crítica para la operación del sistema hidráulico.

Por su parte, la muestra obtenida de la manguera presenta el mayor contenido de agua entre las muestras analizadas, con un valor de 57,7 ppm ($\approx 0,006\%$). La pendiente más pronunciada de la curva refleja una mayor incorporación de humedad, asociada a la circulación del aceite en el sistema y a una mayor exposición a condiciones operativas que favorecen la absorción de agua. A pesar de este incremento, el contenido de agua no alcanza niveles asociados a la emulsificación o a la degradación severa del lubricante.

En conjunto, los resultados muestran una tendencia progresiva de aumento del contenido de agua desde el aceite nuevo sellado hasta el tanque y, posteriormente, hasta la manguera, coherente con el grado de exposición del aceite dentro del sistema hidráulico. Sin embargo, los valores obtenidos indican que el lubricante aún se mantiene en condiciones funcionales, lo que permite identificar una etapa temprana de contaminación por humedad sin que se evidencien riesgos operativos inmediatos.

7.3 Definición de la línea base del aceite hidráulico mediante análisis FTIR, Karl Fischer y conteo de partículas.

Con base en los análisis fisicoquímicos realizados sobre los aceites nuevos disponibles para la flota operativa de la emac, se establece la línea base del aceite hidráulico, que servirá como referencia técnica para la evaluación y comparación de las muestras provenientes del tanque y de la manguera, así como de los aceites usado y con contenido de agua analizados posteriormente. La línea base representa las condiciones iniciales del lubricante en estado óptimo, sin exposición a factores ambientales ni a las condiciones de operación.

Para la definición de esta línea base se emplearon los resultados obtenidos mediante espectroscopía FTIR, conteo de partículas conforme a la norma ISO 4406 y determinación del contenido de agua por el método de Karl Fischer, considerando que estos métodos permiten caracterizar de manera integral el estado químico y el nivel de contaminación del aceite.

7.3.1 Línea base FTIR del aceite hidráulico

La línea base FTIR se establece a partir de los valores obtenidos en el análisis del aceite nuevo sellado, que representan la condición inicial del lubricante antes de cualquier proceso de degradación o contaminación. En la Tabla 16 se presentan los parámetros FTIR considerados como referencia del sistema hidráulico.

Tabla 16

Resultado FTIR de la línea base del aceite hidráulico.

Parámetro	Viscosidad a 40 °C (cSt)	Viscosidad a 100 °C (cSt)	Nitración (Abs/0,1 mm)	Oxidación (Abs/0,1 mm)	Sulfatación (Abs/0,1 mm)	TAN (mg KOH/g)
Valor	62.3	6.7	0.027431	0.012473	0.19308	0.0

Nota. Elaboración propia.

Los valores presentados en la Tabla 16 se adoptan como parámetros de referencia FTIR, característicos de un aceite hidráulico ISO VG 68 en condición nueva, y constituyen la base para la comparación con las muestras sometidas al almacenamiento, la circulación y el uso operativo.

7.3.2 Línea base de limpieza del aceite – Conteo de partículas

El nivel de limpieza del aceite hidráulico se estableció mediante el conteo de partículas sólidas, tomando como referencia el aceite nuevo sellado. Este análisis permite definir el estado inicial de limpieza del lubricante, lo cual es fundamental para evaluar posteriormente el ingreso de contaminantes sólidos al sistema hidráulico. En la Tabla 17 se presentan los resultados del conteo de partículas correspondiente a la línea base del aceite hidráulico

Tabla 17

Resultado del conteo de partículas de la línea base del aceite hidráulico.

Parámetro	$\geq 4 \mu\text{m}$	$\geq 6 \mu\text{m}$	$\geq 14 \mu\text{m}$	Código ISO 4406
Valor	26.8	1.2	0	12/7/0

Nota. Elaboración propia.

El código ISO 4406: 12/7/0 obtenido para el aceite nuevo sellado se establece como el nivel de limpieza base del sistema, a partir del cual se evaluarán las variaciones observadas en las muestras de aceite provenientes del tanque, de la manguera y de los aceites en servicio.

7.3.3 Línea base de contenido de agua – Método Karl Fischer

El contenido de agua del aceite hidráulico se determinó mediante el método de Karl Fischer, empleando exclusivamente el aceite nuevo sellado, con el fin de establecer un valor de referencia libre de interferencias asociadas al uso o a la exposición ambiental.

Tabla 18

Resultado Karl Fisher de la línea base del aceite hidráulico.

Parámetro	Agua (ppm)	Agua (%)
Valor	-8.5	-0.001

Nota. Elaboración propia.

El valor obtenido indica un contenido de agua prácticamente nulo, lo cual es característico de un aceite nuevo sellado y confirma su condición inicial óptima. Este resultado se adopta como referencia de humedad para el análisis comparativo de aceites expuestos a condiciones de almacenamiento, operación y contaminación.

7.3.4 Definición de la línea base del sistema hidráulico

A partir de los resultados obtenidos mediante los análisis FTIR, conteo de partículas y Karl Fischer, se establece que los valores presentados en las Tablas 16, 17 y 18 constituyen la línea base del aceite hidráulico del sistema y representan las condiciones iniciales del lubricante en estado nuevo. Esta línea base se utilizará como criterio técnico de referencia para evaluar los cambios fisicoquímicos y de contaminación observados en las diferentes muestras analizadas en el presente estudio.

7.4 Análisis comparativo posterior al establecimiento de la línea base

Una vez establecida la línea base del aceite hidráulico ISO VG 68 a partir del análisis del aceite nuevo sellado, se procedió a realizar análisis comparativos entre aceites en condiciones reales de operación y aceites con contaminación controlada por agua.

El objetivo de esta etapa fue evaluar el comportamiento del lubricante frente a condiciones representativas del uso operativo y de la contaminación específica, utilizando la línea base previamente definida como referencia técnica. Este enfoque permite identificar variaciones fisicoquímicas asociadas al envejecimiento del aceite y a la presencia de contaminantes, sin perder de vista las condiciones iniciales óptimas del lubricante.

7.4.1 Análisis del aceite hidráulico usado en operación

A continuación, en la Tabla 19, se presentan los resultados obtenidos mediante el análisis FTIR (Espectroscopía de Infrarrojo por Transformada de Fourier) del aceite hidráulico ISO 68 de la flota en operación de la EMAC. Con el objetivo de analizar el comportamiento de los aceites usados en comparación con el aceite línea base, identificando posibles procesos de oxidación, nitración y otros factores relacionados con el envejecimiento y el desgaste del lubricante.

Tabla 19

Resultados de FTIR en las muestras de aceite hidráulico usado.

Muestra	Viscosidad a 40 °C (cSt)	Viscosidad a 100 °C (cSt)	Nitración (Abs/0,1 mm)	Oxidación (Abs/0,1 mm)	Sulfatos (Abs/0,1 mm)	TAN (mg KOH/g)
ISO_68_EMA C_LB	62.3	6.7	0.027431	0.012473	0.19308	0.0
EMAC_ISO68 _U_AMA-531	114.4	12.6	0.048099	0.036172	0.20289	1.4
EMAC_ISO68 _U_AMA-1092	112.7	12.5	0.045935	0.038965	0.19832	1.4
EMAC_ISO68 _U_AMA-1093	111.7	12.4	0.049367	0.03028	0.20328	1.4
EMAC_ISO68 _U_AMA-851	113.2	12.6	0.041987	0.032361	0.20297	1.3
EMAC_ISO68 _U_AMA-334	114.9	12.7	0.050388	0.10286	0.23985	1.3
EMAC_ISO68 _U_AMA-0526	114.0	12.6	0.062686	0.044742	0.21163	1.5
EMAC_ISO68 _U_AMA-1345	112.2	12.6	0.051478	0.021498	0.23659	1.3
EMAC_ISO68 _U_AMA-1095	108.4	12.4	0.041925	0.036559	0.19758	1.3

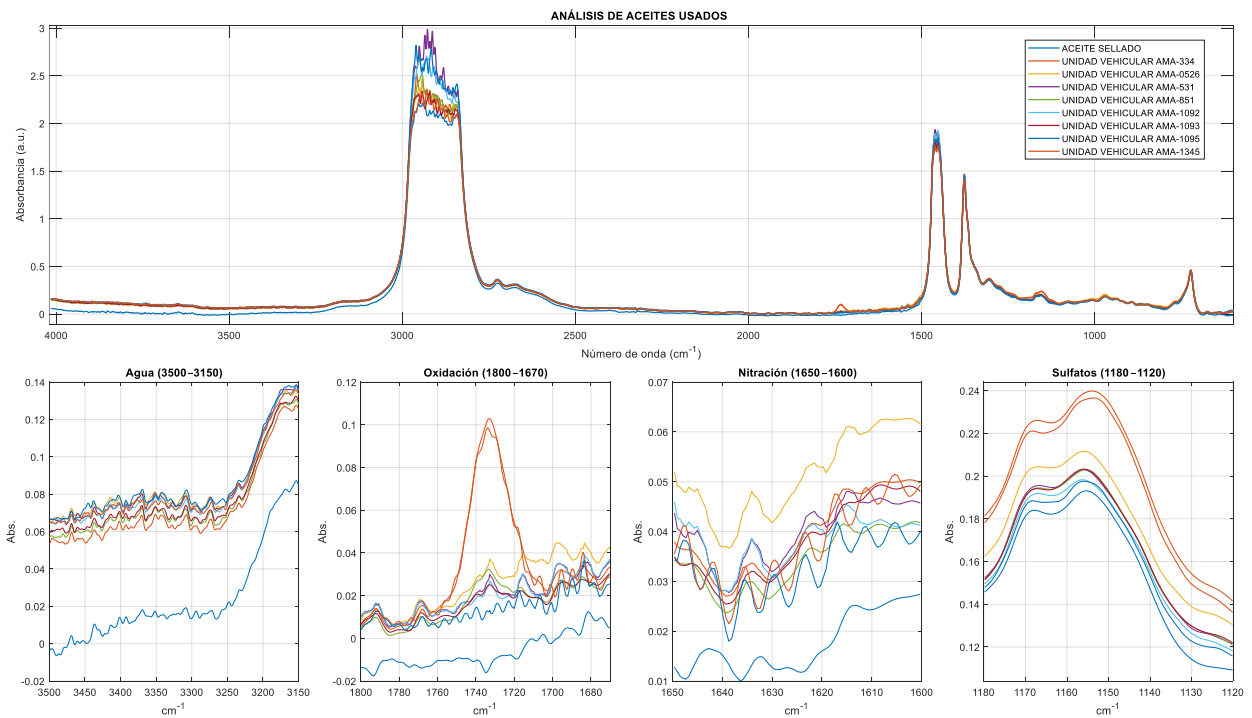
Nota. Elaboración propia.

La muestra de aceite base (ISO_68_EMAC_LB) presenta valores de viscosidad e índices FTIR bajos, junto con un TAN nulo, lo que confirma su condición estable y su adecuación como referencia del sistema. En comparación, los aceites usados evidencian incrementos moderados en la viscosidad, la nitración, la oxidación y el TAN, asociados a su uso y a su circulación en el sistema hidráulico. No obstante, estas variaciones se mantienen dentro de rangos operativos aceptables, lo que permite identificar una evolución del lubricante sin alcanzar estados críticos de degradación.

A continuación, la Figura 20 muestra los espectros de estos aceites en operación obtenidos mediante FTIR, con el objetivo de visualizar, contrastar y corroborar las tendencias identificadas en la tabla anterior. Esta gráfica permite analizar de forma comparativa el comportamiento del aceite base y de los aceites en servicio, lo que facilita la interpretación de los resultados obtenidos.

Figura 20

Análisis comparativo de aceites ISO 68 usados.



Nota. Elaboración propia.

Se observa que la muestra de aceite de línea base (ISO_68_EMAC_LB) presenta niveles de absorbancia bajos y estables en las regiones asociadas a oxidación, nitración y sulfatación, confirmando su condición química estable y su uso como referencia. En comparación, los aceites usados evidencian incrementos moderados de absorbancia en estas regiones espectrales, lo que refleja el efecto del uso y la circulación del lubricante en el sistema hidráulico. No obstante, las variaciones observadas respecto a la línea base corresponden a un proceso normal de envejecimiento del aceite, sin indicios de degradación severa.

7.5 Análisis del impacto de la contaminación por agua en el comportamiento fisicoquímico del aceite hidráulico ISO 68 bajo condiciones controladas

El análisis del aceite hidráulico con contaminación controlada por agua se realizó con el propósito de simular un escenario problemático potencial para la flota de EMAC-EP, considerando que la humedad es uno de los contaminantes más críticos en los sistemas hidráulicos.

En el contexto operativo de la empresa, la determinación del contenido de agua mediante el método de Karl Fischer, si bien precisa, presenta limitaciones relacionadas con su costo, accesibilidad y tiempo de análisis. Frente a esta realidad, se planteó la necesidad de evaluar el comportamiento del aceite contaminado con agua mediante espectroscopía FTIR, como una alternativa más económica y rápida para la detección indirecta de humedad.

Por esta razón, se realizaron pruebas experimentales adicionando porcentajes controlados de agua al aceite hidráulico ISO 68, con el fin de generar una base de referencia que permita identificar cómo se manifiesta la presencia de agua en el espectro FTIR del lubricante.

7.5.1 Resultado de Análisis de aceite con porcentaje de agua

En esta sección se presentan los resultados obtenidos mediante el análisis FTIR (Espectroscopía de Infrarrojo por Transformada de Fourier) para el aceite hidráulico ISO 68 línea base y para las muestras de aceite con distintos porcentajes de contenido de agua. El objetivo de este análisis es evaluar el efecto de la presencia de agua en las propiedades fisicoquímicas del lubricante, identificando posibles variaciones en los índices de oxidación, nitración y otros parámetros asociados a procesos de degradación, envejecimiento y pérdida de desempeño del

aceite. La tabla 20 que se presenta a continuación resume los valores obtenidos para cada una de las muestras analizadas.

Tabla 20

Resultados de FTIR en las muestras de aceites con porcentaje de agua.

Muestra	Viscosidad a 40 °C (cSt)	Viscosidad a 100 °C (cSt)	Nitración (Abs/0,1 mm)	Oxidación (Abs/0,1 mm)	Sulfatos (Abs/0,1 mm)	TAN (mg KOH/ g)
ISO_68_EMA C_LB	62.3	6.7	0.027431	0.012473	0.19308	0.0
ISO_68_EMA C_0.05%_AG UA	60.8	6.6	0.055484	0.046143	0.19595	0.0
ISO_68_EMA C_0.10%_AG UA	107.6	12.1	0.052663	0.038578	0.2106	0.2
ISO_68_EMA C_0.20%_AG UA_02	64.7	7.1	0.047964	0.038884	0.19969	0.0
ISO_68_EMA C_0.50%_AG UA_02	64.0	7.1	0.063717	0.059207	0.21013	0.0
ISO_68_EMA C_1%_AGUA	66.6	7.4	0.086001	0.081978	0.22341	0.0

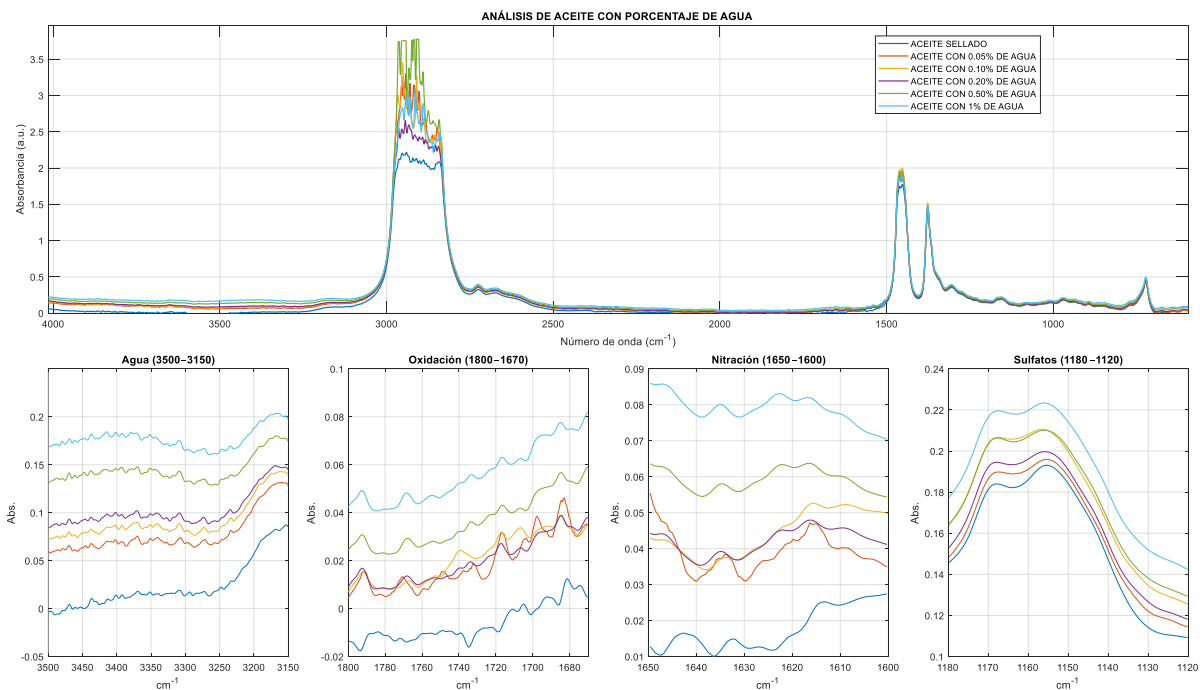
Nota. Elaboración propia

La muestra de aceite base (ISO_68_EMAC_LB) presenta un comportamiento estable en viscosidad e índices FTIR, constituyéndose como referencia del sistema. En comparación, las muestras con porcentajes de agua añadida presentan variaciones graduales en estos parámetros, lo que evidencia la influencia de la humedad sobre el comportamiento del lubricante, sin presentar alteraciones severas en esta etapa del análisis.

A continuación, en la Figura 21, se presenta una representación gráfica del contenido de agua determinado en las muestras de aceite hidráulico, con el propósito de visualizar y contrastar el comportamiento del aceite base frente a los aceites con porcentajes crecientes de humedad. Esta gráfica permite analizar de forma comparativa la influencia del contenido de agua sobre el lubricante, facilitando la interpretación de su evolución y comportamiento en condiciones operativas controladas.

Figura 21

Análisis comparativo del aceite ISO 68 mediante FTIR con porcentaje de agua controlado.



Nota. Elaboración propia

La Figura 21 presenta el análisis espectral FTIR del aceite hidráulico ISO 68 en condición de línea base y con diferentes porcentajes de contaminación por agua añadida de forma controlada (0,05 %, 0,10 %, 0,20 %, 0,50 % y 1 %). El espectro superior corresponde a la comparación global en el rango completo de número de onda, mientras que los subgráficos inferiores muestran ventanas espectrales específicas asociadas a procesos fisicoquímicos relevantes para la evaluación del lubricante.

En el espectro general se observa que el aceite de línea base presenta una señal estable, con niveles de absorbancia bajos y uniformes, característicos de un lubricante nuevo sin degradación química significativa. A medida que aumenta el porcentaje de agua añadida, se observa un incremento progresivo de la absorbancia en regiones específicas del espectro, lo que confirma la influencia directa de la humedad en el comportamiento químico del aceite.

En la región asociada a la vibración de estiramiento O–H (entre 3 200 y 3 600 cm^{-1}), se aprecia un aumento notable de la absorbancia a medida que aumenta el contenido de agua. Esta tendencia es consistente con la presencia de agua disuelta y/o emulsionada en el aceite, y se manifiesta de forma más pronunciada en las muestras con mayores porcentajes de humedad (0,50 % y 1 %), validando la sensibilidad del FTIR para detectar la presencia de agua en el lubricante.

Las ventanas espectrales inferiores muestran variaciones graduales en las regiones asociadas a la oxidación, la nitración y la sulfatación. En particular, se observa un incremento progresivo de la absorbancia en las bandas asociadas a compuestos carbonílicos (oxidación), lo que sugiere que la presencia de agua favorece procesos de degradación química del aceite base y la alteración de los aditivos. Este comportamiento concuerda con los resultados tabulares obtenidos, en los que los índices FTIR de oxidación y nitración aumentan a medida que aumenta el contenido de agua.

Asimismo, se aprecia una ligera modificación en las regiones asociadas a los aditivos del aceite, lo que indica que la humedad no solo actúa como contaminante físico, sino que también influye en la estabilidad química del sistema lubricante. No obstante, para los porcentajes de agua

más bajos (0,05 % y 0,10 %), las variaciones espectrales se mantienen moderadas, lo que sugiere una etapa inicial de afectación sin degradación severa.

En conjunto, el análisis espectral FTIR evidencia una relación directa entre el incremento del contenido de agua y las modificaciones fisicoquímicas del aceite hidráulico ISO 68. La gráfica confirma que la humedad induce cambios detectables en el espectro infrarrojo antes de alcanzar niveles críticos de degradación, lo que respalda el uso del FTIR como herramienta complementaria y eficaz para la detección indirecta de la contaminación por agua en aceites hidráulicos, especialmente en escenarios donde el método Karl Fischer no puede aplicarse de forma rutinaria.

8. CONCLUSIONES

En el presente capítulo se logró establecer de manera técnica y confiable la línea base del aceite hidráulico ISO 68 utilizado en la flota de EMAC-EP, a partir de la integración de los análisis fisicoquímicos realizados mediante espectroscopía FTIR, conteo de partículas sólidas conforme a la norma ISO 4406, y determinación del contenido de agua mediante el método Karl Fischer, de acuerdo con la norma ASTM D630. Adicionalmente, se consideró el número de acidez total (TAN) según la norma ASTM D664, como parámetro complementario para la evaluación del estado químico del lubricante.

La línea base definida representa las condiciones iniciales óptimas del aceite hidráulico, caracterizadas por bajos niveles de degradación química, un alto grado de limpieza según la clasificación ISO 4406 y un contenido de agua no significativo, lo que confirma la idoneidad del lubricante como referencia técnica. Estos valores constituyen un criterio objetivo para evaluar el estado del aceite ante posibles deterioros o riesgos de aplicación en el sistema hidráulico.

El análisis comparativo de los aceites usados en operación evidenció un proceso de envejecimiento progresivo del lubricante, reflejado en incrementos moderados de viscosidad, TAN y parámetros asociados a la degradación química, así como en un aumento del nivel de contaminación por partículas sólidas. No obstante, los resultados obtenidos indican que dichas variaciones se mantienen dentro de rangos operativos aceptables, sin alcanzar condiciones críticas de deterioro.

Por otra parte, el análisis de aceites con contaminación controlada por agua permitió identificar la influencia de la humedad en el comportamiento fisicoquímico del lubricante, lo que generó una referencia experimental del efecto del agua en el aceite hidráulico. Estos resultados respaldan el uso del análisis FTIR como una herramienta complementaria para la identificación indirecta de contaminación por agua, especialmente en contextos donde la aplicación rutinaria del método Karl Fischer puede resultar limitada por costos, accesibilidad o tiempo de análisis.

En conjunto, los resultados obtenidos confirman que la línea base establecida cumple adecuadamente su función como referencia técnica para el diagnóstico del estado del aceite hidráulico ISO 68 en la flota de EMAC-EP, lo que da cumplimiento al objetivo principal de la

investigación y proporciona una base sólida para la implementación de estrategias de monitoreo y mantenimiento preventivo del sistema hidráulico.

9. RECOMENDACIONES

Con base en los resultados obtenidos y en la línea base establecida para el aceite hidráulico ISO 68, se recomienda evitar el almacenamiento de lubricantes en zonas cercanas a áreas de lavado, en ambientes con alta humedad o con exposición directa a agentes contaminantes, ya que estas condiciones favorecen la absorción de agua y el ingreso de contaminantes que pueden alterar las propiedades fisicoquímicas del aceite.

Se recomienda garantizar la hermeticidad de los tanques, recipientes y sistemas utilizados para el almacenamiento y la extracción del aceite hidráulico, con el fin de minimizar el ingreso de humedad ambiental y de partículas sólidas, preservando las condiciones de limpieza y el contenido de agua definidas en la línea base del sistema.

Asimismo, se sugiere mejorar las prácticas de manejo y almacenamiento de mangueras y elementos de transferencia del aceite, evitando su contacto directo con el suelo y ambientes contaminados, dado que los resultados del conteo de partículas evidenciaron un incremento progresivo de contaminación sólida asociado a estos puntos del sistema.

Se recomienda implementar procedimientos de limpieza y control periódicos en los puntos de trasiego del aceite hidráulico, tales como tanques, conexiones y mangueras, con el objetivo de reducir la incorporación de partículas sólidas que puedan incrementar el nivel de contaminación, conforme a la norma ISO 4406.

Adicionalmente, se sugiere utilizar el análisis FTIR como herramienta de monitoreo rutinario del estado del aceite hidráulico, complementándolo con análisis específicos de contenido de agua mediante el método Karl Fischer y de número de acidez total según ASTM D630 y ASTM D664, respectivamente, cuando se detecten desviaciones respecto a la línea base establecida.

Finalmente, se recomienda que la línea base definida en el presente estudio sea adoptada como criterio técnico de referencia para la toma de decisiones en mantenimiento preventivo del sistema hidráulico de la flota de EMAC-EP, permitiendo una detección temprana de posibles deterioros o riesgos de aplicación del lubricante.

10. BIBLIOGRAFÍAS

- ASTM International. (2017). *ASTM D664: Standard test method for acid number of petroleum products by potentiometric titration*. <https://www.astm.org/d0664>
- ASTM International. (2020). *ASTM D6304: Standard test method for water in petroleum products, lubricating oils, and additives by coulometric Karl Fischer titration*. <https://www.astm.org/d6304>
- Big Truck Rental. (2025, junio). *How garbage trucks work? Components and functions*. <https://bigtruckrental.com/blog/environmental/how-garbage-trucks-work/>
- CL Vehicles. (s. f.). *The main structural components of compactor garbage truck*. https://www.clvehicles.com/blog/the-main-structural-components-of-compactor-garbage-truck_b250
- Cummins Inc. (2024). *Valvoline™ Classic Blue™ hydraulic oil ISO 68* [Ficha técnica]. <https://www.cummins.com/sites/default/files/2024-10/classic-blue-hydraulic-oil-iso-68.pdf>
- Hong, S.-H., & Jeon, H.-G. (2022). Monitoring the conditions of hydraulic oil with integrated oil sensors in construction equipment. *Lubricants*, 10(11), 278. <https://doi.org/10.3390/lubricants10110278>
- Hydraulic machinery. (s. f.). En *Wikipedia*. https://en.wikipedia.org/wiki/Hydraulic_machinery
- Hydraulic cylinder (telescopic). (s. f.). En *Wikipedia*. https://en.wikipedia.org/wiki/Telescopic_cylinder
- International Organization for Standardization. (2017). *ISO 4406: Hydraulic fluid power — Fluids — Method for coding the level of contamination by solid particles*. <https://www.iso.org/standard/67321.html>
- Jeon, H.-G., Kim, J.-K., Na, S.-J., Kim, M.-S., & Hong, S.-H. (2022). Application of condition monitoring for hydraulic oil using tuning fork sensor: A study case on hydraulic system of earth moving machinery. *Materials*, 15(21), 7657. <https://doi.org/10.3390/ma15217657>

- McNeilus. (s. f.). *Side loader garbage trucks*. <https://mcneilusgarbage Trucks.com/side-loader-garbage-trucks>
- Municipal Truck. (s. f.). *How the hydraulic system works in a garbage truck*. <https://www.municipaltruck.com/how-the-hydraulic-system-works-in-a-garbage-truck/>
- Noria Corporation. (s. f.). *Water in oil contamination. Machinery Lubrication*. <https://www.machinerylubrication.com/Read/192/water-contaminant-oil>
- Noria Latin América. (2024). *Análisis y control de la contaminación en aceites hidráulicos*. <https://noria.mx>
- Pabsetti, P., Murty, R. S. V. N., Bhoje, J., Mathew, S., Harivenkatesh, R., & Feroskhan, M. (2023). Performance of hydraulic oils and its additives in fluid power system: A review. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1161(1), 012009. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1161/1/012009>
- Parker Hannifin Corporation. (2021). *Guide to contamination standards*. <https://www.parker.com/content/dam/Parker-com/Literature/EMHFF/ConMon/Guide-to-Contamination-Standards.pdf>
- Sajjad, A., Khan, A. S., & Irfan, M. (2021). *Hydraulic systems and their maintenance: Importance of hydraulic fluids in equipment performance*. Springer.
- Sun, Y., & Wang, P. (2019). Main influencing factors of hydraulic oil performance for construction machinery. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 677(2), 022129. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/677/2/022129>
- Valvoline Global. (s. f.). *ATF Dexron III-H / Mercon*. <https://www.valvolineglobal.com/es-co/valvoline-ATF-Dexron-III/>
- Vickers–Eaton. (s. f.). *Manual de hidráulica industrial*. Scribd. <https://es.scribd.com/document/767646130/Vickers-Eaton-Hydraulics>
- Wikipedia. (s. f.). *Garbage truck*. https://en.wikipedia.org/wiki/Garbage_truck

11. ANEXOS

Anexo 1

Equipo FTIR y accesorios utilizados para el análisis de aceites hidráulicos.



Nota. Fotografía tomada por los autores.

Anexo 2

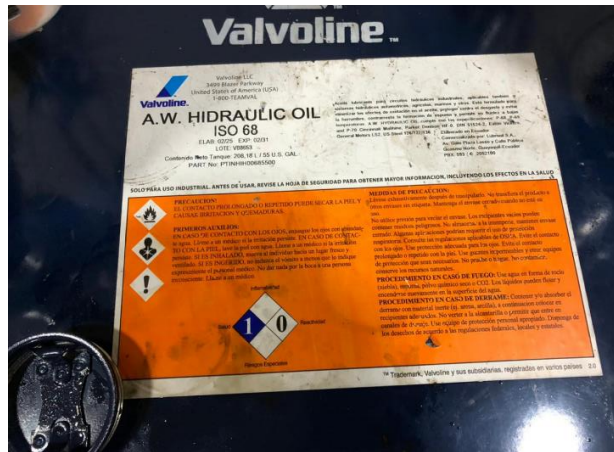
Sistema de almacenamiento y dispensación de aceite hidráulico



Nota. Fotografía tomada por los autores.

Anexo 3

Etiqueta técnica y de seguridad del aceite hidráulico Valvoline AW ISO 68.



Nota. Fotografía tomada por los autores.

Anexo 4

Preparación y pesaje de muestras de aceite hidráulico previo al análisis de laboratorio.



Nota. Fotografía tomada por los autores.

Anexo 5

Área de lavado de vehículos cercana al área de almacenamiento de la flota EMAC-EP.



Nota. Fotografía tomada por los autores.

Anexo 6

Autores del estudio durante la preparación de muestras de aceite para el análisis Karl Fischer.



Nota. Fotografía tomada por los autores.

Anexo 7

Equipo de titulación Karl Fischer utilizado para la determinación del contenido de agua en aceites hidráulicos.



Nota. Fotografía tomada por los autores.

Anexo 8

Reactivos y sistema de titulación Karl Fischer utilizados para la determinación del contenido de agua en aceites hidráulicos.



Nota. Fotografía tomada por los autores.

Anexo 9

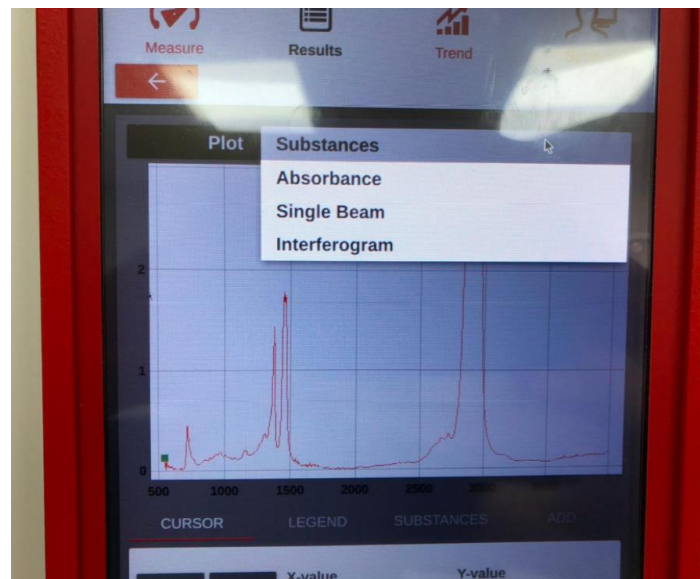
Muestras de aceites hidráulicos recolectadas en la flota EMAC-EP para análisis de laboratorio.



Nota. Fotografía tomada por los autores.

Anexo 10

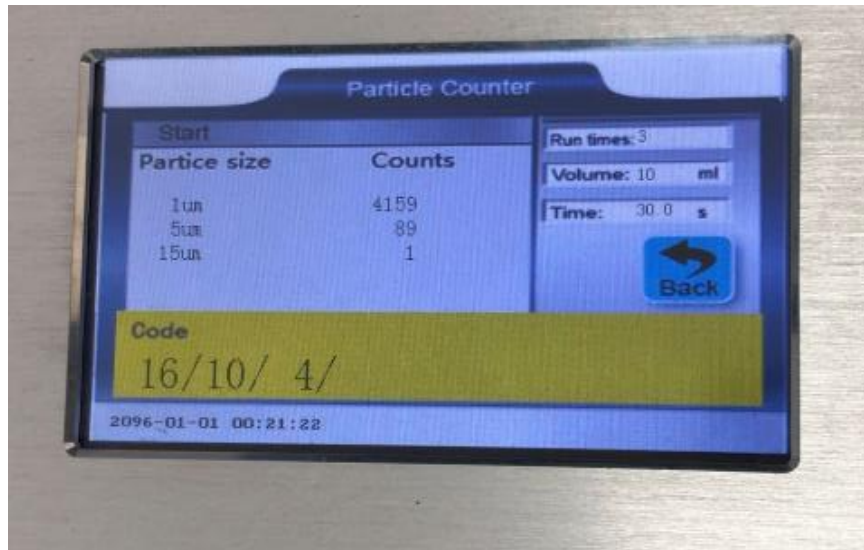
Interfaz del equipo FTIR mostrando el espectro de absorbancia obtenido en el análisis de aceite hidráulico.



Nota. Fotografía tomada por los autores.

Anexo 11

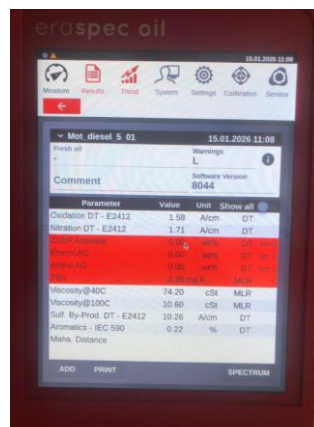
Pantalla del contador de partículas mostrando el conteo por tamaño y el código ISO 4406 obtenido.



Nota. Fotografía tomada por los autores.

Anexo 12

Resultados del análisis fisicoquímico del aceite hidráulico obtenidos mediante equipo ERASPEC Oil.



Nota. Fotografía tomada por los autores.

Anexo 13

Autor durante la ejecución del método Karl Fischer para la determinación del contenido de agua en aceites hidráulicos.



Nota. Fotografía tomada por los autores.

Anexo 14

Visualización de partículas de agua dispersas en la muestra de aceite hidráulico previo al análisis Karl Fischer.



Nota. Fotografía tomada por los autores.

Anexo 15

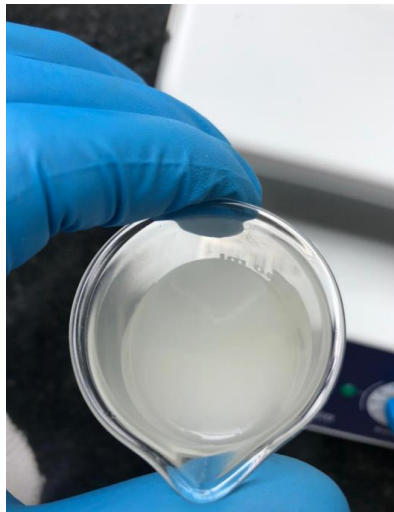
Determinación de la masa de agua utilizada para la preparación de muestras aceite-agua previo al análisis Karl Fischer.



Nota. Fotografía tomada por los autores.

Anexo 16

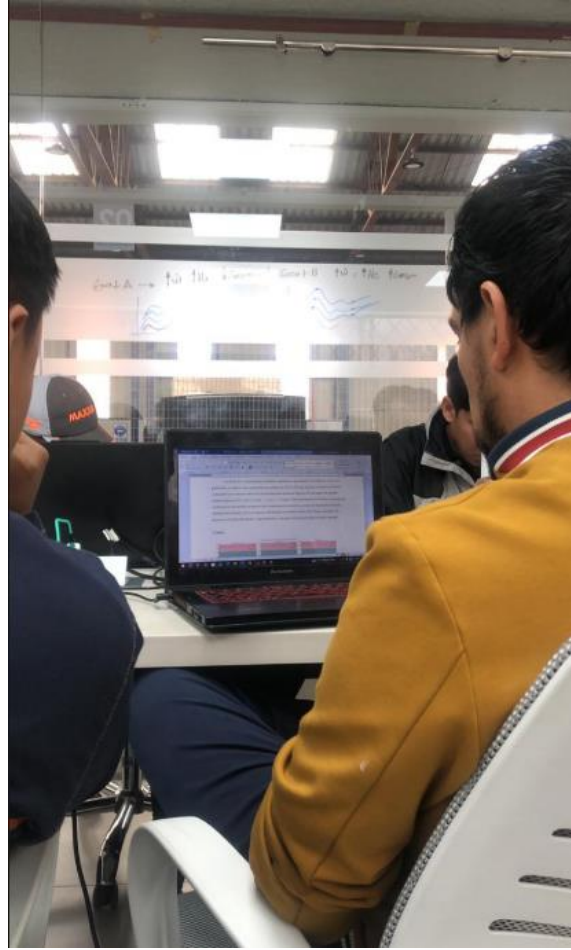
Emulsión agua-aceite observada durante la preparación de muestras para análisis.



Nota. Fotografía tomada por los autores.

Anexo 17

Tutor académico realizando correcciones y revisión del trabajo de titulación



Nota. Fotografía tomada por los autores.

Anexo 18

Reporte automático del ensayo de contenido de agua por Karl Fischer en aceite nuevo sellado.



Nombre de aparato: Eco Coulom
Número de serie: 001000796096
Nombre del usuario:

Eco Coulometer
Versión de programa: 5710280003
2026-01-27 14:31:08

INFORME RESULTADOS

Método KFC KFC Aceite
Hora det. 2026-01-27 14:30:21
Duración de determinación 33 s

DATOS DE MUESTRA

ID1 ISO_EMAC
ID2 68_T_01.KF
Número de muestra 1
Peso mtra 1.00 g

INFORMAC. PUNTO FINAL

EP -8.5 µg
Deriva (automática) 19.3 µg/min
Tiempo corr. deriva 31 s

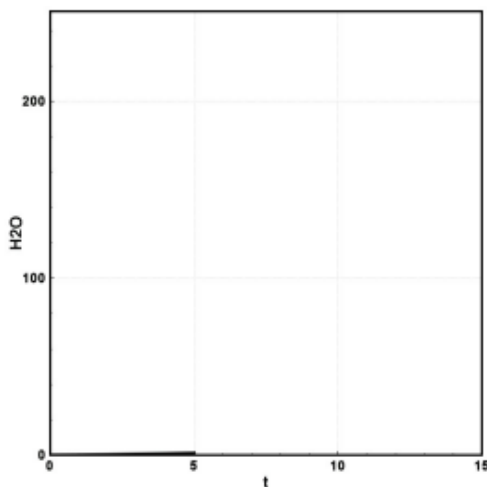
CRITERIOS DE PARADA

Parada normal

RESULTADOS

R1 = Water -8.5 ppm
R2 = Agua -0.001 %

CURVA



LISTADO PUNTOS MED.

Sr.No	t/s	U/mV	H2O/ μ g	μ g/min
1	0.0	0.0	0.0	19.3
2	2.0	50.8	0.4	15.2
3	4.0	50.9	0.9	15.8
4	6.0	50.9	1.4	16.5

Nota. El presente reporte corresponde a la salida original generada por el equipo Karl Fischer coulombimétrico (Metrohm Eco Coulometer) durante el análisis del contenido de agua en la muestra de aceite hidráulico.

Anexo 19

Reporte automático del ensayo de contenido de agua por Karl Fischer para aceite de manguera.



Nombre de aparato: Eco Coulom
Número de serie: 001000796096
Nombre del usuario:

Eco Coulometer
Versión de programa: 5710280003
2026-01-29 13:01:35

INFORME RESULTADOS

Método KFC KFC Aceite
Hora det. 2026-01-29 13:00:12
Duración de determinación 74 s

DATOS DE MUESTRA

ID1 ISO_68
ID2 EMAC_MG
Número de muestra 8
Peso mtra 0.1 g

INFORMAC. PUNTO FINAL

EP 5.8 µg
Deriva (automática) 19.9 µg/min
Tiempo corr. deriva 72 s

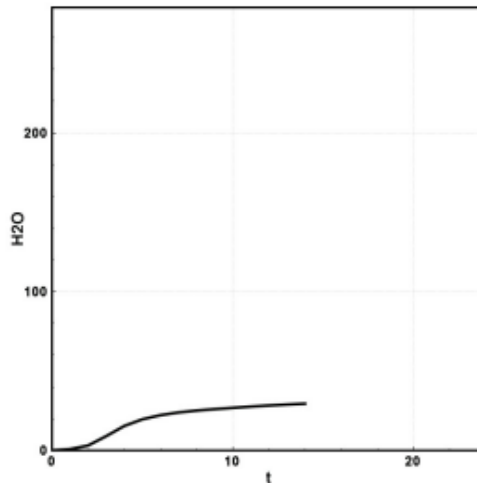
CRITERIOS DE PARADA

Parada normal

RESULTADOS

R1 = Water 57.7 ppm
R2 = Agua 0.006 %

CURVA



LISTADO PUNTOS MED.

Sr.No	t/s	U/mV	H2O/µg	µg/min
1	0.0	0.0	0.0	19.9
2	2.0	76.3	3.5	158.7
3	4.0	66.6	15.8	392.2
4	6.0	57.2	22.4	250.5
5	8.0	54.2	25.2	72.0
6	10.0	52.2	26.9	48.6
7	12.0	51.7	28.4	45.0
8	14.0	51.0	29.5	32.0

Nota. El presente reporte corresponde a la salida original generada por el equipo Karl Fischer coulombimétrico (Metrohm Eco Coulometer) durante el análisis del contenido de agua en la muestra de aceite hidráulico.

Anexo 20

Reporte automático del ensayo de contenido de agua por Karl Fischer para aceite de tanque.



Nombre de aparato: Eco Coulom

Eco Coulometer

Número de serie: 001000796096

Versión de programa: 5710280003

Nombre del usuario:

2026-01-29 13:06:05

INFORME RESULTADOS

Método KFC KFC Aceite
Hora del. 2026-01-29 13:05:05
Duración de determinación 51 s

DATOS DE MUESTRA

ID1 ISO_68
ID2 EMAC_T
Número de muestra 9
Peso mtra 0.1 g

INFORMAC. PUNTO FINAL

EP 2.3 µg
Deriva (automática) 19.4 µg/min
Tiempo corr. deriva 50 s

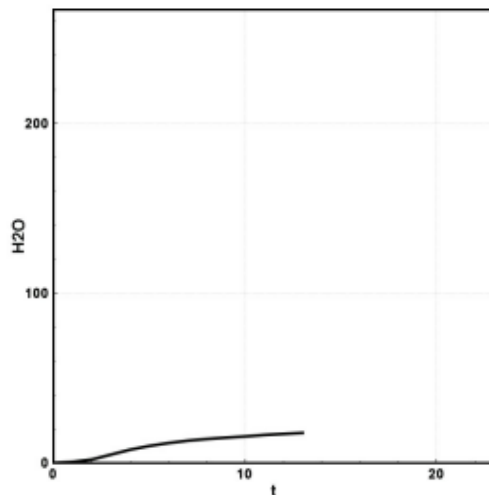
CRITERIOS DE PARADA

Parada normal

RESULTADOS

R1 = Water 23.0 ppm
R2 = Agua 0.002 %

CURVA



LISTADO PUNTOS MED.

Sr.No	t/s	U/mV	H2O/ μ g	μ g/min
1	0.0	0.0	0.0	19.4
2	2.0	63.9	1.6	66.4
3	4.0	60.9	7.3	178.0
4	6.0	56.4	11.4	140.1
5	8.0	54.0	13.9	73.8
6	10.0	52.7	15.5	47.3
7	12.0	51.8	17.0	45.3
8	14.0	51.8	18.2	34.9

Nota. El presente reporte corresponde a la salida original generada por el equipo Karl Fischer coulombimétrico (Metrohm Eco Coulometer) durante el análisis del contenido de agua en la muestra de aceite hidráulico.